Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Кирос Кабасканго Валерия Эстефания

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ГАЗОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ОГНЕВОМ РАФИНИРОВАНИИ НИКЕЛЯ

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (металлургия)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Бажин В.Ю.

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ 9

1.1 Основные характеристики высокотемпературного металлургического агрегата на примере газовой отражательной печи 12

1.2 Основные принципы работы и конструкции футеровки газовой отражательной печи 16

1.3 Анализ термодинамических процессов и параметров для эффективного управления рафинированием никеля 19

1.4 Кинетика процессов и тепловой баланс отражательных печей при огневом рафинировании никеля 25

1.5 Цель и задачи исследований 36

1.6 Выводы по первой главе 37

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКПЕРИМЕНТАЛНЫХ ИСЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РАФИНИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ В ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ 38

2.1 Технология и методология рафинирования никеля 38

2.2 Современные способы моделирования технологических процессов для повышения эффективности на примере газовой отражательной печи 41

2.3 Построение математической модели процесса горения отражательной печи 44

2.4 Пример CFD моделирования процесса горения отражательной печи 49

2.5 Выводы по второй главе 55

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ РАФИНИРОВАНИИ НИКЕЛЯ 56

3.1 Изучение влияния состава природного газа на тепловой КПД отражательной печи 56

3.2 Моделирование влияния состава природного газа на тепловой КПД отражательной печи 64

3.3 Создание программы для ЭВМ «Программа контроля теплового баланса отражательной печи с учетом условий сжигания и состава природного газа» 67

3.4 Выводы по третьей главе 70

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ГАЗОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ОГНЕВОМ РАФИНИРОВАНИИ НИКЕЛЯ 71

4.1 Создание системы контроля и алгоритма управления горелками отражательных печей ... 71

4.2 Разработка программы для ЭВМ: «Программа цифрового автоматизированного контроля тепловым режимом газовых отражательных печей при огневом рафинировании никеля» 80

4.3 Экономические расчеты за счет оптимизации работы горелки 84
4.4 Выводы по четвертой главе 86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 88
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 90
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666633 101
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616676 102

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В качестве основных агрегатов для производства никеля и его сплавов в России и за рубежом используются отражательные печи (ОП) с газовыми горелками среднего давления. Несмотря на то, что при сжигании природного газа в газовых горелках достигаются устойчивые значения высоких температур для выплавки никеля, возникают проблемы при регулировании теплового состояния печи, что не позволяет регулировать состав газов в атмосфере печи в заданном температурном интервале. В процессе огневого рафинирования наблюдаются высокие неконтролируемые потери металла, вызванные экзотермическими реакциями побочных продуктов и флюсовой композиции. Газонасыщенность расплава при взаимодействии с компонентами продуктов сгорания, особенно с сажистым углеродом приводит к локальным перегревам из-за резкого неконтролируемого перепада температур от 1300ºС до 1600ºС, когда возникают зоны перегрева металла и футеровки печи.

Регулирование температуры печи осуществляется при помощи управления давлением газопламенной горелки за счет изменения длины факела через контроллер ПЛК, а само значение температуры фиксируется только косвенно по температуре отходящих газов или периодическими ручными измерениями температуры металла при помощи термопар. Это недостаточно для решения задач по устойчивости энергообеспечения и автоматизации технологического процесса огневого рафинирования. При неконтролируемом перегреве расплава существует риск локального разрушения и расплавления футеровки печи, и попадания примесей и неметаллических включений в металл, что неизбежно приводит к ухудшению технико-экономических показателей плавки (ТЭП).

Степень разработанности темы. Исследованиями в области автоматизации процесса огневого рафинирования меди и никеля в отражательных печах занимались известные российские ученые Ванюков А.В., Гальнбек А.А., Диомидовский Д.А., Шалыгин Л.М., Теляков Н.М., Белоглазов И.Н., Чухров М.В., Русинов Л.А., Цемехман Л.Ш., Набойченко С.С., Жуков В.П., а также зарубежные ученые Bogusz A., Coley K.S., Elliott R., Jouhari A.K., Kim S.J., Pickles C.A., Zhang J.

В ранее выполненных исследованиях и разработках систем АСУ не уделялось должного внимания качеству и количеству метана в природном газе в горелках, что непосредственно определяет теплотворную способность газа, и последующее изменение давления газа (длины факела) для рационального управления тепловым балансом печи с учетом физико-химических процессов огневого рафинирования никеля.

Поскольку тепловое состояние отражательной печи не контролируется в полном объеме, необходим ввод дополнительных параметров в систему управления и автоматизации печи

(АСУ ТП) для управления газовыми потоками горелок, и обеспечения равномерного нагрева расплава. Дополнительное регулирование горелками через систему подачи природного газа в зависимости от его состава обеспечит стабилизацию температурных режимов во время плавки никеля и его сплавов.

Актуальным является создание алгоритма контроля и управления тепловым балансом печи и, в частности, атмосферы печи при регулировании состава природного газа и его давления в зависимости от изменения его теплотворной способности, с учетом физико-химических процессов плавки и взаимодействия продуктов горения, с получением зависимостей влияния состава и количества тепла природного газа от газовых горелок печи ОП на выход продуктов плавки и ее эффективность.

Цель работы – повышение эффективности контроля и управления тепловым режимом отражательных печей за счет рациональной подачи природного газа через газовые горелки при огневом рафинировании никеля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить аналитическое исследование процесса огневого рафинирования никеля с учетом контролируемых параметров плавки, и провести патентное исследование, существующих технических решений по рациональным энергетическим режимам для устойчивой работы отражательных печей.

2. Изучить влияние состава природного газа на тепловое состояние печи с учетом процесса горения и физико-химического взаимодействия продуктов горения с компонентами расплава никеля.

3. Создать математическую модель с учетом ввода дополнительных контролируемых параметров для управления тепловым состояние отражательной печи для горелок среднего давления при изменении теплотворной способности природного газа.

4. Разработать алгоритм управления газовыми горелками в зависимости от изменений режимов эксплуатации с учетом технологических условий и времени огневого рафинирования в режиме энергосбережения.

Методология и методы исследований

Работа проводилась с использованием метода научного обобщения, и анализа литературных источников и патентных материалов, позволяющих выявить направления совершенствования эффективности контроля и управления отражательными печами за счет рациональной подачи природного газа через горелки среднего давления с помощью системы автоматического управления процессом огневого рафинирования никеля.

В диссертационной работе применялись данные, полученные в промышленных исследованиях процесса плавки металлического штейна никеля в отражательной печи АО

Норильский никель. Также была составлена кинетическая модель рафинирования никеля с учетом горения природного газа при изменении температурных режимов. Обработка и анализ результатов исследований, полученных в ходе полупромышленных испытаний, проводились стандартными методами статистики с использованием программного пакета MATLAB R2019 и ORIGIN 2021. Математическое моделирование процессов, протекающих в отражательной печи, выполнялось после обработки промышленных данных с использованием компьютерных программ AVEVA PRO/II, ANSYS 2019R3 и UNITY XL Pro от Schneider Electric.

Научная новизна

– получены зависимости влияния химического состава природного газа на качество никеля при плавке в отражательных печах, которые указывают на повышение температуры плавки на 70-100^{o}C при увеличении содержания метана на 20-30% в природном газе горелок;

– разработана и обоснована рациональная блок-схема управления горелкой, и алгоритм контроля сжигания топлива для каждой горелки, при которой снижается расход газа на 10-15%;

– научно обоснованы дополнительные функции контроля параметров АСУ ТП для управления подачей природного газа через горелки среднего давления при различных технологических условиях и режимах работы печи.

Положения, выносимые на защиту:

1. Заданный режим нагрева расплава в отражательной печи при снижении количества потерь тепла на 10-12% во время рафинирования никеля обеспечивается регулированием давления в горелках газовых печей с учетом состава природного газа и его теплотворной способности.

2. Снижение безвозвратных потерь металла во время огневого рафинирования на 4-5% достигается с помощью разработанного алгоритма контроля и управления тепловым режимом отражательной печи с учетом заданных параметров содержания метана в природном газе.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– разработан и обоснован алгоритм управления тепловым режимом отражательной печи при огневом рафинировании, который может быть использован на предприятиях никелевой промышленности в плавильных цехах с учетом качества используемого природного газа;

– реализованы в промышленных условиях программные продукты для контроля технологических параметров отражательных печей и управления процессом плавки никеля (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2020665700 и №2021615658), которые апробированы в условиях действующего производства на типовых отражательных печах АО «Новгородский металлургический завод» и АО «Codelco» в Эквадоре;

– получен акт о внедрении результатов диссертационного исследования от 28.01.2022 подтверждающий внедрение результатов в учебный процесс федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Степень достоверности результатов исследования подтверждается исследованиями, применением современных методов статистического анализа, сходством теоретических и экспериментальных результатов, тестированием системы управления на промышленных архивных данных о протекании технологического процесса плавки никеля в отражательной печи.

Апробация результатов. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на: 73-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ» (Москва, 22-25 апреля 2019 г.); XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о земле» (Москва, 2-3 апреля 2019 г.); International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (Красноярск, 4 марта 2020 г.); Международном семинаре «Нанофизика и Наноматериалы 2020» (Санкт-Петербург, 25-26 ноября 2020 г.); VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (Санкт-Петербург, 23-24 апреля 2020 г.); 1st International Conference on Advances in Material Science and Technology (Красноярск, 31 июля 2020 г.); XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources” (Санкт-Петербург, 17-19 июня 2020 г.); Международной конференции «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов» (Иркутск, 22-23 апреля 2021 г.); XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources” (Санкт-Петербург, 31 мая – 6 июня 2021 г.).

Личный вклад автора состоит в постановке цели, формулировке задач и разработке методики исследований; в проведении анализа научно-технической литературы и патентного поиска; выполнении исследований; разработке технических решений, адаптированных к условиям действующего плавильного производства никеля и меди; научном обобщении полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12-ти печатных работах, в том числе в 2-х статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4-х статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы из 115 наименований, двух приложений. Диссертация изложена на 102 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 13 таблиц.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Никель, тяжелый цветной металл, широко распространенный природный элемент. Чистый никель - это серебристо-белый твердый металл, который может соединяться с другими металлами, такими как железо, медь, хром и цинк, с образованием сплавов. Эти сплавы используются в производстве монет, ювелирных изделий и таких компонентов, как клапаны, теплообменники, лопатки турбин, детали реакторов, электрические и теплопроводящие компоненты и т.д. Большая часть никеля используется для производства нержавеющей стали, но он также может соединяться с другими элементами, такими как хлор, сера и кислород, с образованием соединений никеля. Многие соединения никеля легко растворяются в воде и имеют зеленый цвет. Соединения никеля используются при никелировании, окрашивании керамики, производстве батарей и в качестве катализаторов, которые являются веществами, ускоряющими химические реакции. Никель содержится во всех почвах, выделяемых вулканическими выбросами [99].

По приблизительным оценкам, в выявленных месторождениях по всему миру имеется около 74 миллионов тонн никеля. Никельсодержащие месторождения бывают двух основных типов, и некоторые из них представлены на рисунке 1.1.

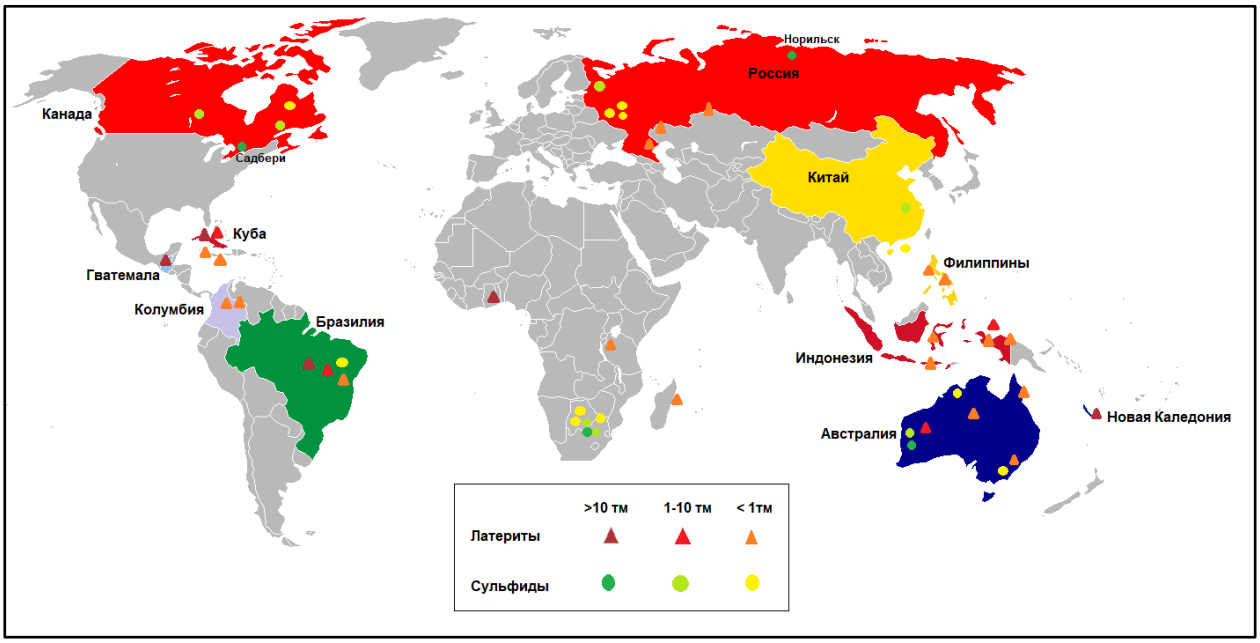


Рисунок 1.1 – Мировые ресурсы сульфидных и окисленных никелевых руд (латеритов)

Видно, что преобладают месторождения сульфида никеля, которые образуются в результате осаждения никелевых минералов гидротермальными флюидами. Эти сульфидные месторождения также называются магматическими сульфидными месторождениями и находятся в Австралии, Канаде, России и Южной Африке и обычно связаны с металлами группы меди и платины [74].

Месторождения никелевого латерита, которые образуются в результате выветривания ультраосновных пород и обычно разрабатываются открытым способом. Они встречаются в основном в зоне тропиков в Западной Австралии, Новой Каледонии, Индонезии, Колумбии, Кубе, Венесуэле, Эквадоре, Бразилии и Доминиканской Республике [31].

Физические свойства никеля

При комнатной температуре никель имеет некоторые характеристики: серебристо-белый цвета, находится в твердой фазе, очень хорошо проводит тепло и электричество, обладает отличной пластичностью, что позволяет использовать его для производства тонких листов, а также податлив, способен к деформации. Сформованный или изогнутый, он тверже железа, а также легко намагничивается и представляет собой ферромагнитный материал [58].

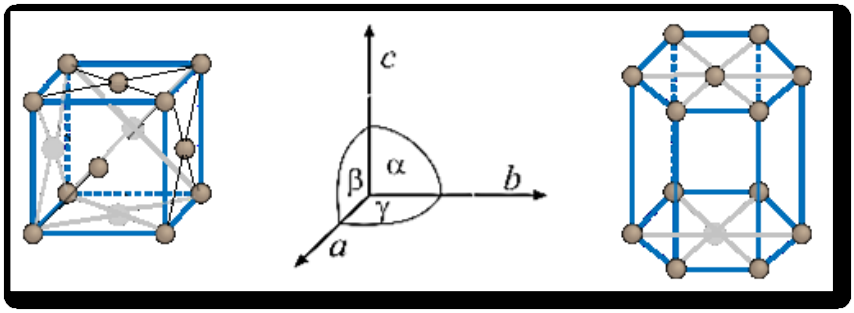
В таблице 1.1 представлены количественные значения наиболее полезных физических свойств никеля. Самым любопытным физическим свойством никеля является ферромагнетизм, это свойство является непременным атрибутом некоторых сплавов на основе стали и магнитных материалов, которые, кроме того, характеризуются минимальным значением коэффициента теплового расширения. В диапазоне температур от 0 до 357,85°C никель проявляет ферримагнитные свойства, которое объясняется структурными характеристиками внешних электронов ([Ar] 3d84s2) в соответствии с электронной конфигурацией его атомов [53].

Таблица 1.1 – Физические свойства никеля

Свойство	Значение	
Группа металлов	Тяжелый	
Молярный объем ($см^3$/моль)	6,6	
Плотность (г/$см^3$)	8,902	
Модуль упругости (ГПа)	196-210	
Удельное электрическое сопротивление (Ом·мм²/м)	0,4	
Предел прочности (МПа)	470	
Предел упругости (МПа)	210	
Относительное удлинение (%)	40	
Твердость по Бринеллю ($МН/м^2$)	600-800	
Коэффициент теплового расширения при 0°C [1/K]	Линейный	$13{,}5 \cdot 10^{-6}$
	Объемный	$38{,}5 \cdot 10^{-6}$

Никель вместе с железом (3d6 4s2) и кобальтом (3d7 4s2) также являются ферромагнитными, то есть относятся к элементам с незавершенной 3d электронной оболочкой (3D переходные металлы). Электроны в незавершенной оболочке создают нескомпенсированный спиновый магнитный момент, эффективное значение которого для атомов никеля составляет 6 μ_B (магнетон Бора). Положительное значение обменного взаимодействия в кристаллах никеля приводит к параллельной ориентации атомных магнитных

моментов, то есть к ферромагнетизму. По той же причине сплавы и различные соединения никеля, такие как оксиды, галогениды и другие, магнито упорядочены. Никель - один из важнейших магнитных материалов и сплавов с минимальным значением коэффициента теплового расширения [107], и это связано с его высокой ценой. Кроме того, он обладает высокой твердостью и хорошей пластичностью (податливость). В условиях нормального давления и при комнатной температуре никель представляет собой металл с гранецентрированной кубической решеткой, как показано на рисунке 1.2 с кристаллическим параметром a = 3,5236 Å и атомным радиусом r = 0,1246 Å.



а) б)

Рисунок 1.2 – Кристаллические решетки никеля: а) гранецентрированный кубик: a=b=c, α=β=γ=90˚ и б) шестиугольная: a=b≠c, α=β= 90˚, γ=120 ˚

Никель, как и другие чистые металлы, имеет однородную и упорядоченную структуру, которая гарантирует способность проводить ток за счет образования металлических связей. Однако состав никеля может быть разным, что может сказаться на его свойствах. Никель считается бета (β) никелем [70]. С кубической структурой с центром на гранях, и именно они определяют свойства металла, такие как пластичность, обрабатываемость, ферромагнетизм и т.д. Когда никель подвергается процессу распыления в атмосфере водорода, он не реагирует, но претерпевает аллотропные изменения, модифицируя свою кристаллическую структуру до альфа-никеля (α), эта кристаллическая решетка имеет гексагональную конфигурацию, показанную на рисунке 1.2б кристаллических параметров a = 2,65 Å и c = 4,32 Å. Когда никель нагревается до 200°C, кристаллическая фаза альфа переходит в бета-кристаллическую фазу [75]. Это необходимо учитывать при организации технологии пирометаллургической переработки никелевого сырья в отражательных печах, для сохранения структурных свойств никелевых сплавов. Структурная наследственность в итоге определяет основные физические свойства, и устойчивая работа печи должна способствовать этому.

Химические свойства

Химическую активность никеля по отношению к другим металлам относят к средним значениям. Ni характеризуется медленной скоростью массобмена водорода в кислотах, что

делает его устойчивым к образованию коррозии. Никель также обладает хорошей химической стойкостью благодаря довольно плотной адгезионной и защитной оксидной пленке. Следовательно, химические свойства наблюдаются только во время химической реакции, и воздействием продуктов горения природного газа и водорода можно в целом пренебречь. В таблице 1.2 представлены значения некоторых химических свойств никеля. Никель образует соединения со степенью окисления +1, +2, +3 и +4. Кроме того, соединения никеля со степенью окисления +4 редки и нестабильны. Оксид никеля Ni_2O_3 - сильный окислитель [53].

Таблица 1.2 – Химические и атомные свойства никеля

Характерные свойства	Значение
Атомный номер	28
Валентность	2, 3
Степень окисления	+2
Электроотрицательность (шкала Полинга)	1,91
Ковалентный радиус (пм)	115
Радиус иона	(+2e) 69
Радиус атома (пм)	124
Электронная конфигурация	[Ar] 3d8 4s2
Энергия ионизации (кДж/моль)	768,2
Атомная масса (г/моль)	58,71
Температура кипения (°C)	2730
Температура плавления (°C)	1453
Уд. теплота плавления (кДж/моль)	17,61
Уд. теплота испарения (кДж/моль)	378,6
Молярная теплоёмкость [Дж/(к моль)]	26,1
Теплопроводность [Вт/(м·K)] при 300K	90,9

Исходя их этих свойств задаются режимы плавления и значения по температуре при пирометаллургической переработке никелевого сырья, в частности на стадии огневого рафинирования в отражательных печах. Необходимо отметить, что в отличие от огневого рафинирования меди интервал температур для никеля гораздо выше (1550-1700^{o}C), и в этой связи стоят задачи регулирования и управления тепловым состоянием печи более масштабней [66].

1.1 Основные характеристики высокотемпературного металлургического агрегата на примере газовой отражательной печи

Отражательная печь как основной агрегат для плавки никелевого сырья, представляет собой тип печи, который в основном имеет прямоугольную форму. Печь сверху покрыта куполом (сводом) из клинового кирпича из огнеупорного материала, выполняющего функцию отражения тепла. Эти печи всегда имеют дымоход для выхода газов сгорания, которые обычно находятся в противоположном положении от горелок. Это место в печи, как правило имеет

стабильный температурный диапазон, и именно в нем устанавливают термопары для косвенного определения темпера туры плавки [5].

Топливо, которое, как правило, является природным газом, не находится в непосредственном контакте с расплавом, а скорее нагревает его с помощью прерывистого пламени, поэтому, нагрев происходит косвенно [25].

Печь используется для плавки никелевого концентрата и отделения шлака, а также для плавки руды и рафинирования или плавления других металлов. В процессе плавки расплавленная руда смешивается из загрузочного окна, поэтому тепло воздействует равномерно на всю поверхность расплава печи.

Отражательная печь состоит из футеровки с наклонным подом, который позволяет «расплавленному металлу» стекать в литниковый канал, через который он выходит наружу, где из кармана он заливается в формы или изложницы. На этом наклонном поду обрабатываемый шихтовой материал располагается равномерно по периметру, и имеет небольшую высоту [7].

Стандартные внутренние размеры отражательных печей (рисунок 1.3) имеют следующие значения: длина 30–35 м, ширина 8–11 м, высота 4,4–4,9 м, площадь пода 180–360 м . Для расчетов теплового состояния и управления температурным режимом в расчетах применяли именно такие размеры печи ОП.

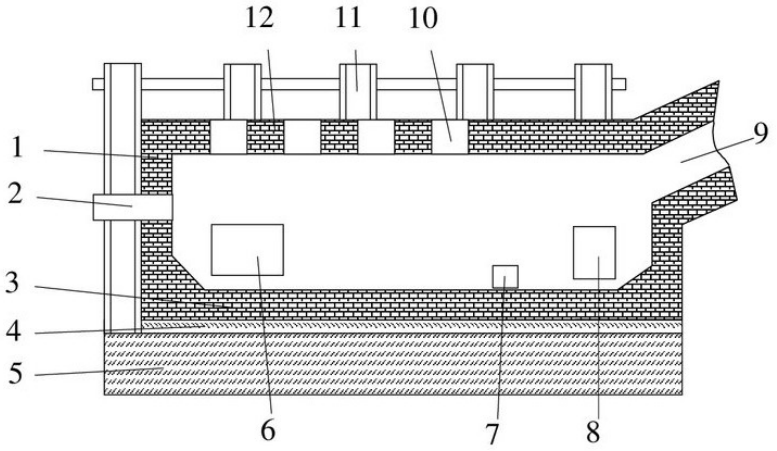


Рисунок 1.3 – Типовая газовая отражательная печь для плавки никеля

Отражательная печь содержит следующие элементы и конструкции: 1 – стены; 2 – топливо сжигающие устройства (газовые горелки); 3 – под; 4 – выстилка (лещадь); 5 – фундамент; 6 – окно для заливки конвертерного шлака; 7 – шпуровое устройство для выпуска штейна; 8 – окно для выпуска шлака; 9 – аптейк; 10 – загрузочные отверстия; 11 – каркас; 12 – свод печи

Печь состоит из фундамента, стен, подины (лещади), свода, каркаса, устройства для загрузки шихты и выпуска продуктов плавки, а также горелок (форсунок) для сжигания

топлива. Продукты горения природного газа и полупродуктов плавки (промышленных газов) отводятся через газоход в систему ГОУ.

Фундамент – (основание печи) представляет совокупность конструктивных элементов конструкции, задача которых состоит в том, чтобы передавать свои нагрузки или элементы, опирающиеся на нее, на основу, распределяя их таким образом, чтобы они не превышали допустимого давления или не создавали зональных нагрузок. Поскольку сопротивление грунта, как правило, меньше, чем сопротивление опор или стен, которые оно поддерживает, площадь контакта между грунтом и фундаментом должна быть пропорционально больше, чем опорные элементы, за исключением очень связных скальных грунтов [51]. Фундамент важен, потому что это группа элементов, которые поддерживают всю надстройку печи. Стабильность здания во многом зависит от типа грунта, на которой оно находится. Верхняя часть фундамента для удобства транспорта расплавов поднята выше нулевой отметки на 3–4 м.

Стены печей (боковая футеровка) – это те, которые контактируют с жидкой массой до определенной высоты. Они покрыты высокоогнеупорным магнезитовым и хромом магнезитовым кирпичом в зависимости от той части, которая будет контактировать со шлаком и расплавом [111].

Лещадь печи устанавливается и собирается на фундаменте. Ее изготавливают либо наварной из кварцевого песка, либо полностью из динасового кирпича в виде обратной арки. Общая толщина лещади – 0,6–1,5 м.

Горелки (форсунки) – это устройства, которое облегчает смешивание топлива и окислителя и в котором происходит сгорание, называется горелкой. В некоторых устройствах, как правило, малой мощности, в которых используется газообразное топливо (природный газ), горелка может быть уменьшена по размерам до трубки или диска с перфорациями, через которые протекает газ, вводимый через инжектор, и который создает посредством трубки Вентури индукцию окислительного воздуха [111]. Горение инициируется искрой розжига или иногда приближается к пламени вручную. По мере увеличения мощности сгорания функция газовой горелки усложняется до тех пор, пока в промышленных горелках она не станет элементом, который приводит топливо в контакт с окислителем в заданной пропорции, в форме и условиях, обеспечивающих непрерывное его сгорание, стабильный и контролируемый, с максимальной производительностью для обеспечения устойчивого режима нагрева и плавления шихты. Наиболее распространенное топливо для отражательных печей – природный газ [111], который имеет определенный теплотворный потенциал для нагрева шихты и проведения всего цикла плавки.

Плавка никеля и никелевых сплавов, отражательных печах

Отражательная печь является наиболее универсальным устройством, используемым для плавки никеля и его сплавов. Это печь с предварительным подогревом топлива, в которой концентраты или продукты плавятся с образованием отдельных слоев жидкого никеля и шлака [90]. Размеры отражательных печей значительно различаются, но наиболее распространенные современные печи имеют длину 33 м (внутренняя часть), ширину 10 м и высоту 4 м (от дома до хранилища). Печи этих размеров производят порядка 500-800 тонн металла (от 35 до 45% Ni) и 300-900 тонн шлака в день [34].

Широкое использование отражательных печей обусловлено их высокой степенью универсальности. Тепло для плавки обеспечивается сжиганием топлива, которое горит внутри печи, и прохождением горячих газов сгорания над расплавом. Все типы шихтовых материалов загружаются кусками или тонкими полосами, влажными или сухими, которые легко расплавляются при высокой активной поверхности [82].

По сравнению с другими процессами при отражательной плавке используются большие количества горючих углеводородных компонентов, поскольку в процессе реализуется потенциально доступное количество энергии от окисления загрузки сульфидного или латеритного сырья. Следовательно, в ситуациях, когда универсальность не имеет большого значения, в настоящее время предпочтение отдается процессам, в которых используется процесс окисления сульфидов для получения большей части необходимой им энергии для плавления щихты.

В никелевой промышленности газовые отражательные печи играют очень важную роль, поскольку они позволяют получать металлический никель, это печи, которые характеризуются следующими факторами: а) высокой температуры, необходимой для получения никеля, б) обеспечением чистоты загружаемого в печь шихтового материала, в) сохранением планом производства печи [56].

Металлургическая промышленность продолжает оставаться одним из крупнейших потребителей энергии в мире, поэтому вопросы энергосбережения стоят особенно остро. Изменение климата является результатом деятельности человека, что усилило стремление к совершенствованию управлением энергопотреблением в этой отрасли, в том числе, и в аспекте снижения углеродного следа в процессе горения и сжигания углеводородного топлива. При более высоких по значениям температур для плавки никелевого сырья вопросы энергосбережения и затрат на потребление топлива стоят более значимо [64].

Рациональное использование энергии в металлургии функционально связано с различными процессами производства никеля (нагрева и сушки шихты, обжига, восстановления или плавления и рафинирования), но существует возможность разработки различных стратегий

энергосбережения для каждого процесса, в частности, и относительно производства никеля и его сплавов в отражательных печах. Одним из высокоэффективных процессов управления энергопотреблением является модернизация процесса плавление/рафинирование, который является общим для производства первичного и вторичного никеля. В этом процессе расплавленный никель выдерживается в печи при определенной температуре и резкие изменения температуры могут более 200-250oC, для достижения необходимого качества и структуры для последующих процессов обработки, экструзии или ковки. Для этого используется отражательная печь, которая обычно работает с низким КПД теплового преобразования, которое находиться в пределах 10-12% [24].

Первым шагом в любой программе управления энергопотреблением и повышением эффективности подачи топлива является учет источника энергии и каналов рассеивания. Отражательные печи на природном газе наиболее широко используются в процессе плавки никеля из-за их более высокого теплового КПД [8] по сравнению с печами индукционного и резистивного нагрева. Отражательные печи не воздействуют потоком пламени непосредственно на расплав в шахте, а отражаются от его поверхности и от свода печи в виде потока лучевой и тепловой энергии. Следовательно, передача тепла от пламени к металлу в основном контролируется излучением [76].

Эффективность тепловых процессов в высокотемпературных металлургических установках основана, прежде всего, на стоимости одной тонны произведенного никеля и удельном расходе топлива на 1 тонну товарного металла. Также, на эффективность производства никеля оказывают влияние культура эксплуатации техники, управление отходами и принципы энергосбережения [65].

Учитывая, что в производстве никеля потребляется много энергии, каждое мероприятие по повышению энергоэффективности приводит к значительной экономии.

Наиболее популярные варианты для энергосбережения следующие: оптимизация параметров футеровки печей, рекуперация энергии из отходящих дымовых газов, оптимизация конструкции горелки при рациональной подаче топлива, и определенно заданная циркуляция дымовых газов. Часть из них реализована в данной работе.

1.2 Основные принципы работы и конструкции футеровки газовой отражательной печи

Во время непрерывного процесса плавки никелевого сплава печь ОП через заданные периоды от нагрева и до плавления шихты нагревается до заданных температур. Твердые частицы шихты периодически перемещаются вдоль боковых стенок (футеровки), где они образуют настыли и создают форму рабочего пространства печи ФРП, которая служит

резервуаром для расплава непрерывного литья после открытия летки. Шлак периодически выходит по мере его образования внутри печи до определенного уровня, а расплав после завершения процесса сливается через нижнее леточное отверстие.

Периоды и процессы, происходящие в печи проходят в несколько промежутков времени, в которые надо учитывать скорость и количество подаваемого топлива в рабочее пространство с учетом заданных интервалов температур:

- Шихта нагревается, сушится и начинает плавиться;
- Процесс плавления с образованием и разделением расплава и шлака;
- Сплав отделяется от шлака и осаждается на подине;
- Слив расплава и шлака в леточные отверстия и литниковые системы.

Для производства никелевых сплавов требуется значительное количество подводимого тепла, и, следовательно, большая часть руды перемещается вдоль боковых стенок в первой половине печи (от конца горелки) перед загрузочной частью. Меньшая часть шихты занимает оставшуюся половину печи, в этой области твердые вещества подвергаются процессу перемешивания и диффузии для того, чтобы в основном защитить боковые стенки с образованием настыли. Удаление шлака осуществляется как можно дальше от зоны плавления, чтобы увеличить время, необходимое для осаждения вновь расплавленный руды (незавершённое производство виде «болота в печи») [18] .

Для выпуска штейна служат литниковые системы (летки) периодического действия, которые после окончания выпуска закрывают глиняной пробкой, но иногда для выпуска штейна предусматривают переливные сифонные устройства [9] .

Шлак выходит на противоположном конце горелки печи через погружное литейное отверстие для предотвращения вытекания случайно расплавленных частиц. Шлак иногда удаляется путем гранулирования с проточной водой или транспортируется в расплавленном состоянии в чугунных изложницах. При всех этих операция, когда происходит большой отток тепла и резко меняется тепловой режим печи, и горелки должны находиться в пассивном режиме работы (управление на минимальном подогреве).

Тепло для плавления и поддержания температуры в заданном интервале (от 1150 до 1650°C) для никелевых сплавов обеспечивается сжиганием природного газа в горелках, расположенных в торцевой части печи. Пламя и горячие отходящие газы от сгорания распространяются по всей длине печи, для передачи и регенерирования как можно большего тепла к руде и шлаку. Газы выходят из печи при температуре около 1250–1300°C и проходят через систему котлов-утилизаторов для рекуперации тепловой энергии. По этой температуре можно судить об истинном значении температуры расплава в печи, и при перегреве печи принимать решение для управляющего воздействия с целью повышения или понижения

температуры за счет регулирования составом газа или скоростью его подачи к поверхности расплава. Необходимо отметить, что в переходные интервалы периодов плавки и ее окончания существуют промежутки, когда состояние печи не контролируется, и она находиться в разбалансированном тепловом состоянии [34]. Этот фактор является определяющим для данного исследования.

Новые конструкции футеровки отражательной печи

Футеровка и ее элементы должны противостоять действию высоких температур и при прямом нагреве находиться без изменения ФРП и разрушений. При этом, необходимо футеровке сохранять свои физические, химические и механические свойства при высокой температуре.

В таблице 1.3 перечислены условия, которые должна выдерживать футеровка, и которые можно разделить на три группы. При этом, следует учитывать, что в большинстве случаев эти факторы могут действовать одновременно.

Таблица 1.3 – Условия устойчивой работы футеровки печи ОП

Условия		
Термическое	**Механическое**	**Химическое**
Высокая температура (перегрев)	Сжатие, сгиб и растяжение (механическое воздействие инструмента и резкое охлаждение)	Шлак (износ и локальные перегревы)
Резкие изменения температуры (перепад температур)	Вибрация (сбои подачи топлива и волнения при ЭМ перемешивании)	Примеси в расплаве (побочные экзотермические реакции восстановления примесных элементов)
Термический удар при заливке металла или штейна	Абразивный износ и эрозия	Газы и пары
–	Давление газов	Окислительные реакции

Из выше сказанного следует, что элементы футеровки (подина, боковая часть, свод), способные выдерживать воздействие высоких температур без оплавления поверхности, сохранять высокую механическую стойкость и прочность, что, в конечном счете, определяет тепловое состояние печи и ее показатели энергоэффективности, поскольку все параметры находятся в состоянии изменяющегося теплового поля и определяют его фронт и форму в зависимости от теплофизических свойств и состояния.

Кроме этого, необходимо учитывать химическую стойкость футеровки к расплавленному металлу, шлакам, газам и парам и огнеупорность, при резких перепадах температуры во время всех периодов плавки.

В основном футеровка состоит из огнеупоров, выполненных из силикатов, оксидов, карбидов, нитридов, боридов, силицидов, углерода, графита и т.д., и это необходимо учитывать при расчете теплового баланса печи.

Алюмосиликатные огнеупоры (основной тип) состоят из кремнезема и глинозема, которые являются пригодными для производства в пяти различных конфигурациях кирпича. Кремнезёмистые огнеупоры состоят в основном из оксида кремния (SiO_2), как и легковесные изоляционные шамотные огнеупоры [41]. Существует два больших типа огнеупоров, из которых сгруппированы изоляционные кирпичи. Это формованные обожженные или прессованные изоляционные кирпичи.

Огнеупоры специальных типов - это огнеупоры, которые могут быть получены от конкретных производителей, используемые для тяжелых условий работы. Также для футеровки используются: каолиновую вату, карбидокремниевые плиты, порошковые соединения из сульфидов, боридов, нитридов и т.д.

Существуют огнеупорные бетоны, которые представляют собой смеси измельченных огнеупорных материалов с соответствующей гранулометрией и связующими добавками [80]. Также есть огнеупорные растворы для склеивания кирпичей и заполнения швов между ними.

Щелочные огнеупоры основаны на MgO. Чистый MgO имеет высокую температуру плавления, хорошую огнеупорность, стойкость к воздействию окружающей среды, которые часто применяются в последнее время для боковой футеровки [62].

Огнеупорные нейтральные изделия обычно включают хроматин и магнезит, их можно использовать для отделения кислых огнеупоров от основных, предотвращая влияние одного на другой.

Специальные огнеупоры - это материалы из углерода, графита, которые используются во многих футеровках, особенно когда в процессе плавления в бескислородной среды. Огнеупорные материалы включают диоксид циркония (ZrO2), циркон (ZrO2.SiO2) и различные нитриды, карбиды и бориды [61], которые эффективно работают непосредственно при контакте с расплавом без разрушения и расплавления.

1.3 Анализ термодинамических процессов и параметров для эффективного управления рафинированием никеля

Термодинамические условия и особенности переработки никелевых латеритных руд

Термодинамика процессов пирометаллургической переработки никелевых латеритов на протяжении многих лет изучалась многими учеными и исследователями. В работе Pickles и Harris [77] определили, что извлечение никеля из никелевых латеритов повышается при

управлении плавкой в заданном интервале температур. В данной работе проведен термодинамический анализ на основе системы Fe - Ni - Co -. Mg - Si - O - H - S - C - Cl для определения температурного режима плавки с учетом условий сульфуризации лимонитового латерита. Авторы установили влияние на процесс плавки переменных, таких как температура, количество серы и углерода, добавок хлора, и непосредственно на извлечение никеля и моносульфида [77]. В другом исследовании они провели моделирование извлечения Zn, Fe и Ca, которые дополнительно содержать небольшие количества Ni, Cu и Pb в мелкодисперсных частицах, образующихся в электродуговой печи при получении стали.

Pickles C. изучал характер поведения примесей при нагреве лимонитовой руды на извлечение некоторых цветных металлов в шлаке, газе, штейне, твердых углеродных металлических фазах[78].

Shoubao Li из Пекинского университета науки и технологий провел исследование процессов переработки никельсодержащих латеритов. Для изучения использовались два образца лимонитовой руды, и термодинамическое исследование проводилось с помощью программного обеспечения FACT (Facility for the Analysis of Chemical Thermodynamics). В процессе восстановления участвовали разные смеси CO/CO_2. Выполнен сравнительный анализ поведения никеля в металлической фазе в процессе восстановления при различных температурах [93].

Известно [4], что растворимость никеля в шлаках определяется процессами термодинамики, которые имеют большое значение в пирометаллургии никеля. Внедрение новых процессов в пирометаллургии повышает извлечение качественного никеля. Чтобы оценить потери никеля в шлаке, необходимо было изучить активность оксида никеля в зависимости от изменяющегося во времени состава шлака [88].

В своей работе C. Ramirez, направил исследование на экспериментальное изучение растворимости и активности оксида никеля в силикатах железа на основе шлаковых соединений. Растворимость никеля в шлаке определялась по критерию равновесия в сплавах на основе никеля или в тиглях из чистого никеля и силикат железа. В этом случае контролировалась смесь газов $CO\text{-}CO_2$. Целью работы было создание структурной модели жидкой фазы силикатных систем, используемых для получения диаграммы состояния SiO2 - NiO - FeO и активности NiO при различных температурах [89].

Dae-Hee Woo выполнил анализ по оптимизации термодинамики фазового равновесия и изучил термодинамические свойства всех известных оксидных фаз в системах NiO - SiO_2, MgO - NiO, CaO - NiO. –SiO_2, MgO - NiO - SiO_2, CaO - MgO - NiO и CaO - MgO - NiO - SiO_2 при давлении в один бар. Он описал фазу расплавленного оксида для модифицированной

квазихимической модели и свободную энергию Гиббса твердых растворов оливина и пироксена [110].

Swinbourne D.R. разработал программную термодинамическую модель лимонитовой руды для производства ферроникеля. С помощью этой модели можно прогнозировать содержание никеля, извлечение никеля и содержание FeO в шлаке в зависимости от извлечения железа из ферроникеля, сделав вывод, что содержание углерода и кремния увеличивает процент извлечения железа [101].

Zevgolis в своей работе изучил термодинамическое поведение и кинетику процесса при обжиге лимонитовой руды. Он пришел к выводу, то степень восстановления оксидов железа и никеля не превышает 33% при 20 мин наблюдений и 76% при 30 мин наблюдений [113].

Tang Xiao-hui исследовал процесс магнитной сепарации лимонитовой руды, и опыты по восстановлению проводились с использованием водорода и оксида углерода в качестве газо-активаторов. Автор проводит термодинамическое изучение процесса латеритной руды и описывает образование комплексных соединений и частиц на разных стадиях процесса восстановления [103].

Pickles C. и Elliott R. разработали термодинамическую модель восстановления лимонитовой руды с использованием монооксида углерода, с целью извлечь максимально никель и восстановить гетит в FeO после магнитной сепарации до ферроникеля [78].

Оценка термодинамических свойств таких систем, как FeO - SiO_2, NiO - SiO_2 и SiO2 - NiO - FeO была изучена для определения их поведения, на основе которого была создана структурная модель, используемая для жидкости фазы [26], а полученные системы являются фундаментальной частью исследования лимонитовой руды, поведение которой изучается и этом исследовании.

Для изучения термодинамики процессов и их применения в минералах, существующих в природе, было создано термодинамическое программное обеспечение, способное моделировать процессы, с получением результатов термодинамических расчетов (ΔG, ΔH, ΔS и т.д.). Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых моделей в реальных условиях по данным работы [79].

Термодинамическое исследование лимонитовой руды также было изучено для процесса плавления с функцией шлака. Jak и Hayes провели исследование диаграммы равновесия системы SiO_2-MgO-Al_2O_3 для получения модели вязкости шлака[55]. Термодинамический анализ процесса рафинирования никеля проведен с помощью программы HSC Chemistry for Windows. Модуль равновесных составов и диаграммы H, S, C и G был получен с помощью программы Origin. Термодинамический анализ процесса рафинирования никеля был проведен с использованием модуля “Equilibrium composition”, который применяется для расчета эволюции

состава равновесия системы в зависимости от изменения концентрации углерода и температуры. Алгоритм расчета, реализованный в данной программе, основан на методе минимизации свободной энергии Гиббса, и может быть универсально использован и для условий нашего исследования.

В данных работах изучаемые системы состоят из смеси лимонитовой руды с углеродом, значения которого находятся в разных диапазонах. Для установления соотношения C/O были выполнены расчеты, которые показали, оно равно 1. В расчетах учитывалось процентное содержание кислорода, а также было установлено содержание оксидов железа и никеля. Следовательно для индикатора можно выбрать значение концентрации газа, например CO. В этом случае, для расчета рационального количества углерода и для определения существования его избыточного количества были выполнены расчеты количественного снижения, полученные с помощью программного обеспечения, при добавлении 5% углерода до достижения отношения, равного 1.

При повышении температуры оксиды металлов становятся более нестабильными, чем оксиды углерода, что приводит к восстановлению Ni и Fe, а также к образованию оксида и диоксида углерода по реакции Белла -Будуара. Эти все вопросы можно свести по решению задач, связанными с вопросами снижения углерода и декарбонизации. В данном случае использование рекуператоров и дожигателей топлива поможет решить проблему по балансу углерода при его частичной регенерации, и в нашем случае.

Первое приближение к ожидаемого поведения исследуемой системы получается путем построения диаграмм Эллингема (T и ΔG), построенных с использованием специального программного обеспечения ПО.

Для термодинамического анализа процесса рафинирования никеля в некоторых работах были составлены фазовые диаграммы системы SiO_2-MgO-Al_2O_3. Варьируя составы системы с добавлением модифицирующей добавки CaO от 6% до 20% оценивали поведение лимонитовой руды при воздействии на них высоких температур, и при этом было отмечено снижение температуры плавления лимонитовой руды.

В другой работе, диаграммы системы SiO_2-CaO-MgO были составлены для наблюдения состава минералогических частиц, которые получились при добавлении CaO, поскольку некоторые из образующихся частиц являются тугоплавкими, и температура плавления в определенные моменты времени может увеличиваться. В таблице 1.4 показан химический состав трех образцов лимонитовой руды, использованных для исследования. Три образца имеют схожий состав в виде оксидов, а количество присутствующих в них никеля и железа различается.

Таблица 1.4 – Химический анализ лимонитовой руды, в мас.%

Образцы	$Fe_2O_{3(тв)}$, (%)	$MgO_{(тв)}$, (%)	$SiO_{2(тв)}$, (%)	$Al_2O_{3(тв)}$, (%)	$NiO_{(тв)}$, (%)
1	16,23	22,70	43,30	1,50	2,59
2	19,69	21,30	40,50	1,94	2,27
3	24,00	23,00	35,60	2,18	1,80

Для нашего исследования можно адаптировать анализ термодинамического процесса лимонитовой руды, который включает температуру плавления и индекс основности, в зависимости от соотношения (в мас. %) содержания основных и кислых оксидов в железорудных материалах, а также, оксидов в доменных, сталеплавильных и других шлаках. Для термодинамического анализа этих минералов при воздействии высоких температур была составлена фазовая диаграмма, соответствующая составам трех исследуемых образцов минералов, как показано на рисунке 1.4.

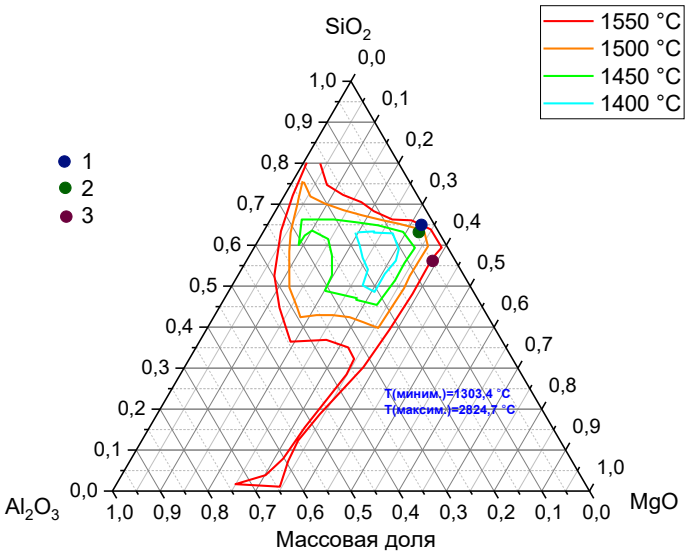


Рисунок 1.4 – Фазовая диаграмма системы SiO_2-Al_2O_3-MgO для трех образцов лимонитовой руды

Фазовая диаграмма системы SiO2-Al2O3-MgO представленная на рисунке 1.4 показывает состав трех использованных образцов минералов. В работе в итоге отмечается, что каждый образец минерала расположен на линии выступа диаграммы для жидкого шлака при температуре 1550°C, и иногда даже выше, что указывает на то, что процесс плавления проходит выше этой температуры.

Для исследования представляет интерес сведение рабочего интервала температур к минимуму, для этого, чтобы осуществить процесс плавления при более низких температурах, например, когда для получения никеля, CaO вводят как модификатор от 3 до 20%. При этом,

согласно данным работы, температура плавления соответствует изменению индекса основности, которое можно увидеть на рисунках 1.5 и 1.6.

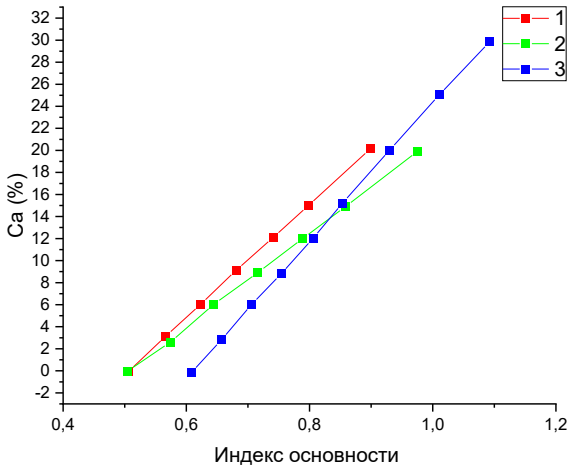


Рисунок 1.5 – Изменение индекса основности в зависимости от % добавленного CaO

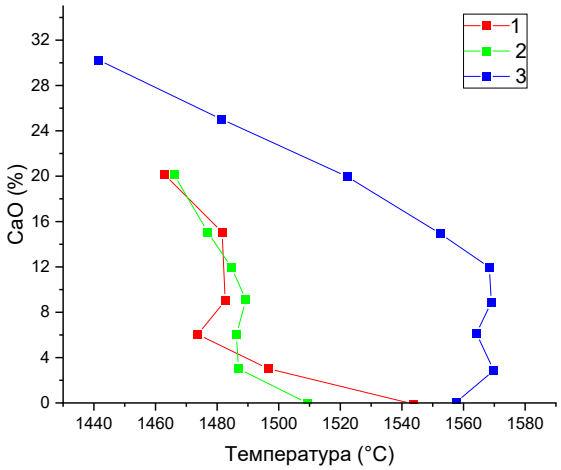


Рисунок 1.6 – Изменение температуры плавления в зависимости от добавленного CaO (шлак/штейн)

На рисунках 1.5 и 1.6 показано изменение температур плавления, которые теоретически достигаются, если в процесс добавляется CaO. Необходимо отметить, что в целом, ввод модификатора может изменить температурный режим плавки, и следовательно тепловое состояние печи. Когда значения основности увеличиваются, что означает, что в процессе плавки образуется жидкая металлическая фаза при более низких температурах. При добавлении CaO повышается индекс основности и при этом, появляется массив частиц с высокими температурами плавления, что приводит к образованию тугоплавких соединений в шлаке.

Для подтверждения вышесказанного для образца лимонитовой руды была составлена фазовая диаграмма, которая показала какие фазы образуются с добавлением CaO. В данном случае, ввод модификатора оправдан для улучшения теплового состояния печи

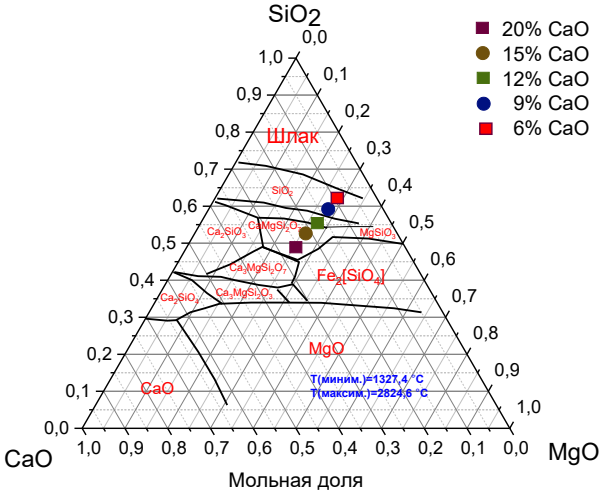


Рисунок 1.7 – Фазовая диаграмма для системы SiO_2-CaO-MgO с различным содержанием CaO

На рисунке 1.7 показана фазовая диаграмма системы SiO2-CaO-MgO с различным содержанием CaO. Из диаграммы видно, что при содержании CaO от 3 до 12% температура плавления увеличивается, достигая температуры, близкой к 1600°C.

При добавках 15% и 20% образуется диопсид CaMgSi2O6 с температурой плавления 1396°C, что способствует образованию никеля при более низких температурах. Следовательно, сплав никеля можно получить при температурах равных 1450°C, 1500°C и 1550°C. При этом индексы основности были увеличены до 0,81 для первого образца, до 0,8 для второго образца и до 1,09 для третей образца. Были получены соответственно следующие температуры их плавления 1463°C, 1466°C и 1442°C.

Анализ данных исследования показал, что для получения никеля нет необходимости повышать температуру процесса, когда 1500°C достаточно для восстановления рассматриваемых металлов. В нашем случае предполагается, что для улучшения условий процесса получения никеля или его сплава можно снизить энергозатраты путем оптимизации работы горелок для поддержания стабильной температуры внутри печи [16], при этом необходимо учитывать присутствие модификаторов, изменяющих тепловой режим плавки.

1.4 Кинетика процессов и тепловой баланс отражательных печей при огневом рафинировании никеля

Кинетика в пирометаллургии изучает процессы, связанные с неравновесными системами во времени. В случае огневого рафинирования меди гетерогенные реакции происходят на границе

раздела «расплав-шлак». Скорость реакции может быть выражена с помощью математической формулы, которая включает изменение состава системы как функцию времени [29].

При низких температурах реакции протекают медленно, и во многих случаях требуется периодический химический контроль. Это связано с высокой энергией активации, когда при повышении температуры скорость химической реакции увеличивается по экспоненциальному закону Аррениуса, и процесс контролируется переносом вещества, демонстрирующим изменение энергии активации [29].

В процессе рафинирования важно учитывать две образующиеся фазы: металл и шлак. Переходные фазы в расплавленных шлаках могут характеризовать этап процесса [45] особенно когда представляют собой одну из преобладающих фаз, которая генерирует наибольшее потребление энергии в металлургии. Тепло, выделяющееся от шлака существенно влияет на тепловое состояние печи ОП, и составляет примерно 220-400 тыс. Вт·ч/год при температурах в диапазоне 1200-1600°С, что дает возможность снизить энергоемкость производства металла [30], что важно для нашего варианта.

Физико-химические характеристики шлака были изучены в работе [44], и разработана методика расчета для уменьшение загрязнения окружающей среды, так как никелевые шлаки это токсичные с вредными компонентами. Кроме того, были проведены исследования возможного использования шлака для получения других продуктов, из которых может быть произведено сырье для других процессов [44].

Кинетика процессов плавления рудных материалов изучается давно [51], в частности проводились эксперименты, которые с определением энергии активации для процесса плавления некоторых минералов. Для исследуемого процесса рафинирования необходимо изучать и принимать во внимание образование в процессе комплексных систем, в зависимости от количества металлического никеля в расплаве и скорости промежуточных реакций. Например, для системы CaO - SiO_2 - $CaCl_2$ в расплавленном шлаке Wang и Morita [109] провели исследование механизма удаления бора в расплаве кремния и изучили, как ведут себя примеси расплаве, предполагая, что это диффузионная модель соответствует первому закону Фика. Авторы исследовали модель с контролируемой диффузией при анализе границы раздела «металл-шлак».

На рисунке 1.8 показаны реакции, которые происходят на границе раздела. Эти реакции относятся к некоторым элементам и их фазам, таким как Fe, Si, Mn, Ca, Al и т.д.

MO и MOσ - это оксиды, M и MS - это сульфид в фазе шлака.

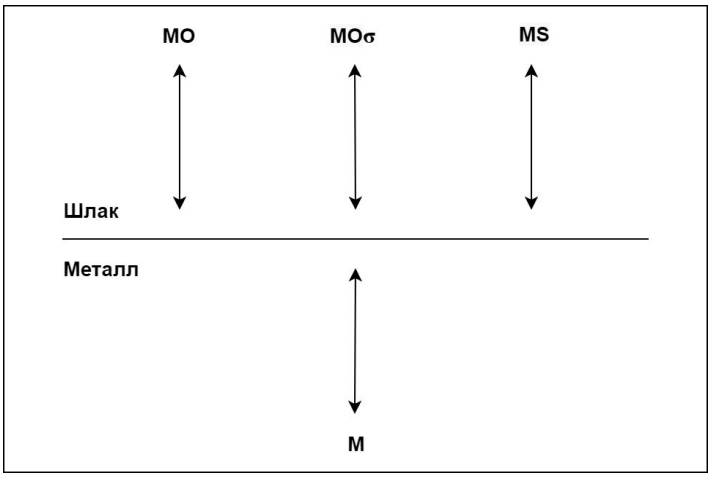


Рисунок 1.8 – Движение элементов «M» между шлаком и металлом

Jouhari R. [57] провел эксперименты по восстановлению FeO с использованием твердого графита (графитовых тиглей). Изменение скорости восстановления изучалось при добавлении CaF_2. Анализ результатов исследований показал, что проходит одна направленная реакция, которая определяет скорость диффузии FeO в фазе расплава, и которая контролирует скорость взаимодействия компонентов.

Mu Wen-ning и Yu-chun в своей работе [72] провели кинетический анализ лимонитовой руды, при плавлении с добавлением гидроксида натрия для извлечения кремния из расплава. Они определили энергию активации процесса удаления кремния и дополнительно заключили, что процесс контролируется химической реакцией.

Zhang [114] описал характеристики и механизм восстановления и плавления меди, а также разделение металла и шлака. Были приняты во внимание переменные, которые важны при плавлении и рафинировании лимонитовой руды, такие как длительность процесса поглощения углерода металлом, остаточное количество FeO в расплавленном шлаке и химический состав шлака. Кроме того, влияет добавка модификатора CaO, которая улучшает процесс восстановления меди.

Важно учитывать, что в процессах, в которых участвуют шлак и штейн, необходимо учитывать разные значения вязкости и текущее изменение свойств. Фаза с низким значением вязкостью, то есть металл (штейн), ведет себя так, как если бы он находился в контакте с твердой фазой. Однако поверхность раздела периодически обновляется, так как шлак и металл находятся в движении, причем, все изменения происходят в зависимости от температурного режима печи.

Механизмы, происходящие в системе «металл-шлак» при изменении температуры и химического состава, состоят из трех важных стадий:

- перенос частиц в металлической фазе, от и к границе раздела;
- реакции на границе металл-шлак;

- движение частиц в шлаке от и до границы раздела.

В высокотемпературных процессах важна граница раздела «металл-шлак», и в принципе ее можно косвенно контролировать по температуре отходящих газов и наличию CO и CO_2. Реакции обмена, которые происходят на границе раздела металл/расплавленный шлак, сложны и мало изучены. Понимание кинетики обменных процессов в неравновесных системах между металлическим соединением (жидким или твердым) и ионным соединением (шлаком) имеет большое значение с точки зрения теплового состояния печи на каждых стадиях процесса. В основных шлаках преобладают ионы $(SiO_4)^{4-}$, а в очень кислых - ионы $(SiO_4)^4$, $(Si_2O_7)^{6-}$, $(Si_nO_{10})^{8-}$ и $(Si_nO_{3n+1})^{2(n+1)}$. Например, доказано, что в определенном диапазоне для Fe/SiO_2, который всегда присутствует в промышленных шлаках, что существуют полиионы типа $(SiO_4)^{4-}$ и $(SiO_7)^{6-}$ [40], которые поглощают тепло с поверхности расплава.

Bogusz и Masset [34] в своих работах предложили новый подход по границе раздела фаз, который учитывает влияние компонентов в шлаке на процесс их диффузии в двух фазах и окислительно-восстановительные реакции. Принимая во внимание, что эти высокотемпературные процессы контролируются диффузией, можно описать как первым, так и вторым законами Фика.

Первый закон Фика основан на потоке атомов (формула 1.1):

$$J_{Ay} = -\rho D_{AB} \frac{d\omega_A}{d_y}, \tag{1.1}$$

где J_{Ay} – плотность потока, (атомы/см^2·с);

D_{AB} – коэффициент диффузии компонента А в присутствии компонента В, (см^2/с);

$\frac{d\omega_A}{d_y}$ – представляет собой градиент концентрации частиц, диффундирующих в положительном направлении у, (атомы/см^3·см).

В нашем случае, контроль состава отходящих газов может стать дополнительным контролируемым параметром.

Второй закон Фика описывает динамическое поведение диффузии атомов на межфазной границе (уравнение 1.2):

$$\frac{dc}{dt} = D\frac{d^2c}{dx^2}. \tag{1.2}$$

Решение уравнения (1.2) зависит от конкретной ситуации и граничных условий во время огневого рафинирования. Второй закон Фика или уравнение диффузии в нашем случае используется для диффузии в неподвижном расплаве, то есть когда v = 0.

При анализе данных в производстве различных сплавов существует несколько подходов, например, Kim [60] выполнил кинетические расчеты и описал одновременные реакции, которые происходят в процессе на границе раздела «шлак-металл» при производстве никелевых

сплавов. В этой модели массоперенос рассчитывается в предположении равновесия на границе раздела, и были определены оптимальные условия для переработки.

Coley [42] выполнил работу, в которой подчеркивает важность процессов, происходящих в шлаках, как источника информации во времени. Было описано, как проходит реакция на границе раздела фаз, и как она может резко измениться под влиянием происходящих ПО побочных реакций, что дает много информации о конкретных механизмах основной реакции.

Andre в своей утверждает, что между двумя несмешивающимися жидкостями происходит химическая реакция, а массоперенос происходит непрерывно на границе раздела жидкость-жидкость [27].

Тепловой баланс отражательных печей при огневом рафинировании никеля изменяется от непрерывной фазы до прерывистой. В печах периодического действия производство производится в кг/ч или в т/ч, в то время как при прерывистой загрузке сырья наиболее важны процессы во время каждой операции (удельный расход на 1 т сырья).

Температура в печах непрерывного действия, таких как ОП, практически постоянна в каждой фазы процесса с течением времени, а температура шихты и расплава изменяется по всей печи от входа до выхода продукта [104]. В печах периодического действия температура загрузки изменяется со временем, но остается относительно постоянной во всей площади подины печи и ее объема в любой момент времения, поэтому, следует различать следующие периоды плавки:

- Процессы, в которых температура регулирования печи остается практически постоянной.

- Процессы, при которых температура печи регулируется по всему циклу нагрева, обслуживания и охлаждения, без изменений тепловой нагрузки во внутренней части печи.

В первом случае, когда вводится шихта, температура печи понижается, и футеровка также охлаждается, хотя ее тепло передается загруженной шихте, но при этом, энергия, выделяемая нагревательными элементами, используется для повторного нагрева футеровки и загрузки до температуры. При этом параметры регулирования печи и заданное значение регулируемых установок остается постоянным [95].

В период, когда вводится шихта, печь находится в разбалансированном тепловом состоянии при более низкой температуре, и увеличивается, когда шихта и материалы нагреваются одновременно со всеми элементами внутри печи по заданному графику в зависимости от длины факела газовых горелок. После периода загрузки шихты при заданной температуре она охлаждается внутри печи вместе с футеровкой. Поэтому важно, чтобы тепло при нагревании и отдавалось и при охлаждении [46], и использовалось рационально.

Следует уточнить, что значение рабочей температуры печи зависит от многих факторов:

• Нагревательные элементы (горелки) будут иметь высокие температуры горения.

• Загрузка даже в конце периода нагрева может производиться при более низкой температуре.

• Флюсовая композиция (покровный флюс), имеет температуру выше, чем у шихты под шлаком, и чем у нагревательных элементов.

Вовремя ручного измерения температуры процесса переносная термопара с ее защитным стержнем указывает на лишь промежуточную температуру с учетом 3-х факторов, которую можно считать усредненной температурой плавильного процесса.

Основные статьи теплогого баланса можно определить с учетом всех стадий процесса и режимов энергопотребления процесса в промышленной печи ОП. Текущий баланс определяется расчетами всех статей энергетического баланса, когда речь идет о конструкции, или путем измерения их в фактической работе, когда это встроенная термопара [91].

Энергетический баланс устанавливается на основе почасовой выработки в печах непрерывного действия с учетом полного цикла загрузки. Однако многие печи непрерывного действия обычно работают только в течение одной или двух смен в день, поэтому следует также учитывать потери тепла в часы остановки печи. В любом энергетическом балансе важно учитывать условия и тепловое состояние в конце периода плавки, в котором выполнялись измерения, и какими они были в начале плавки. Следовательно, в печах с периодическим режимом, измерения охватывают полный цикл загрузки, а в печах непрерывного действия рабочие условия должны быть достаточно постоянными, чтобы возникающие небольшие отклонения теплового режима были незначительными [87].

Среди компонентов и статей энергетического баланса выделяются те, которые включают подвод тепла к процессу (приходные статьи баланса), и те, которые поглощают тепло (расходные статьи) из системы.

а) Приходные статьи при подводе тепла:

- Тепло экзотермических реакций, включая тепло горелок при сжигании топлива;
- Приход тепла с поверхности шлака;
- Приход тепла от стенок печи и от свода;

б) Поглощение (расход) тепла:

- Полезное тепло, необходимое для нагрева шихты и ее расплавления:
- Расход тепла от поверхности шлака и при его сливе;
- Предварительный нагрев воздуха для горелок, включая рекуператоры;
- Нагрев литейных ковшей и литниковых систем;
- Теплота эндотермических реакций;
- Потери тепла от проводимости через боковую футеровку и кожух печи

- Тепловые потери из карманов и литниковых отверстий;

- Потери тепла от охлаждающей воды на водохлаждающий контур печи;

- Тепловые потери, накопленные во флюсе;

- Неконтролируемые потери тепла, которые невозможно измерить в ходе процесса термопарами.

Тепловой баланс при стандартном режиме эксплуатации без значительных остановок или изменений в процессе, особенно в температуре. В печи непрерывного действия это означает постоянство загрузки шихты и работа на незавершенном производстве (болоте печи), регулирование температуры различных зон, постоянство скорости движения расплава и времени его постоянной обработки в течение длительного периода без остановок в течение суток (заданного периода времени).

В печи периодического действия, которая работает циклами с нагревом и охлаждением печи, и указанные периоды они повторяются последовательно без изменений технологических загрузок сырья и материалов (шихтовых компонентов) и температур. В этом случае, особое значение имеет тепло, сохраняемое в покровном флюсе, большая часть которого теряется в каждом цикле в течении промежутка времени. В печах периодического плавления во время технического обслуживания температуры процесса поддерживаются постоянными в заданном интервале через управляющие воздействия по полученному значению косвенного и прямого измерения температуры, когда потери накопленного тепла не имеют значения для энергетического баланса.

В процессе эксплуатации печи необходимо систематически проверять тепловое состояние агрегата путем измерения температуры участков печи, при помощи погружных и контактных термопар [94].

Общая теплота загрузки шихтовых материалов	$q_u = 58\%$
Температура загрузочного и сливного окна	$q_{ct} = 20\%$
Потери тепла от боковой футеровки	$q_p = 11\%$
Потери тепла через загрузочные двери	$q_r = 7\%$
Потери с отходящими газами	$q_a = 4\%$
Общая средняя мощность печи	$p_m = 100\%$

В нашем случае, при рафинировании никеля и его сплавов надо учитывать теплоту испарения, которые происходят при диссоциации составляющих жидкого расплава в печи на более элементарные химические комплексы. Также надо учитывать, что теплота испарения влаги переносится в зависимости от показателей предыдущего процесса нагрева.

Энергетический баланс при стабильной работе (номинальная производительность) печи остается без изменения рабочих условий и применим к периодам, и не является не очень

длительным по времени. Изменение рабочих параметров печи в периодах плавки может привести к значительному увеличению потребляемой энергии. Если необходимо повысить регулирующие температуры для различных зон, необходимо, с одной стороны, нагреть печь до более высоких температур, что требует дополнительной энергии, а также приостановить производство в печи, пока не будет достигнут новый тепловой режим, что приводит к безвозвратным потерям тепла. Несанкционированный и неконтролируемый нагрев вызывает прямые потери тепла в течение определенного времени, и может значительно повысить среднее потребление энергии в процессе рафинирования никеля [79].

Представляет интерес с точки зрения энергосбережения, если печь будет работать при более низком температурном интервале, но для этого необходимо сокращать время охлаждения и простои, в течение которых, тепловые потери остаются практически постоянными и должны учитываться соответствующими статьями в энергетическом балансе. Тогда, время нагрева или охлаждения сокращается в печах с футеровкой на основе керамического волокна, а также при использовании новых огнеупорных и изоляционных кирпичей или бетона могут резко снизить тепловые потери, поскольку они происходят в периоды поддержания стабильной по значениям температуры. Этот фактор имеет большое значение и является критическим для количественного потребления энергии [112].

Кроме того, следует учитывать периоды полной остановки процесса, после которых печь нагревается до ее установки рабочей температуры, что требует большого количества и расхода энергии и, чтобы избежать нежелательные потери необходимо сократить время контакта и загрузки шихты с последующей обработкой расплава под покрывным флюсом.

Тепло, которое подается в печь при сжигании топлива (природного газа), должно быть равным тому, которое расходуется в процессе, с учетом потерь тепла в печи с отходящими газами, которые выходят через дымоход до ГОУ, и их можно направить на регенерацию или предварительный подогрев воздуху для горелок. Потери тепла в этот промежуток времени можно определить как суммарные по формуле (1.3).

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1.3)$$

где Q_1 – общий приход тепла в печь;

Q_2 – тепло, используемое в печи для нагрева шихты и полноты химических реакций;

Q_3 – возвращаемое тепло, горячих отходящих газов, покидающих дымоход и направленных на рекуператор;

Q_4 – тепло, которое теряется с лучевой энергией и преобразуется в тепловую в отражательной печи.

Собственная производительность печи, тепло, используемое в печи для поддержания температуры с учетом полноты химической реакции, когда подаваемое в печь, определяется по формуле (1.4).

$$n = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot 100\% \quad (1.4)$$

Общая производительность тепловой работы печи определяется отношением полезного тепла к поступаемому теплу от газовых горелок и экзотермических реакций, и рассчитывается по формуле (1.5).

$$R_t = \frac{Q_n}{Q} = \frac{Q_n}{Q-q} \cdot \frac{Q-q}{Q} = R_H \cdot R_C \quad (1.5)$$

Расчет теплового баланса отражательной печи необходим для обоснования термодинамических условий плавки при рафинировании никеля. Метод этого решения основан на первом законе термодинамики. На рисунке 1.9 представлена схема отражательной печи. Предельные размеры контролируемой поверхности расплава определены внутренними размерами печи с учетом ФРП, и при этом процесс плавления считается однородным. Тепло, как правило, теряется из печи через теплопроводность и конвекцию от расплава и футеровки в атмосферу печи с выходом отходящих газов и продуктов горения в систему газоходов (ГОУ). Поскольку поток газов в отражательной печи не является постоянным и зависит от физико-химических процессов, массы в объеме печи и высоты расплавленных материалов, которые меняются со временем, их необходимо контролировать через заданный период, даже ориентировочно в зависимости от общепринятых термодинамических условий и кинетики реакций превращения во время химических реакций, и при взаимодействии флюса.

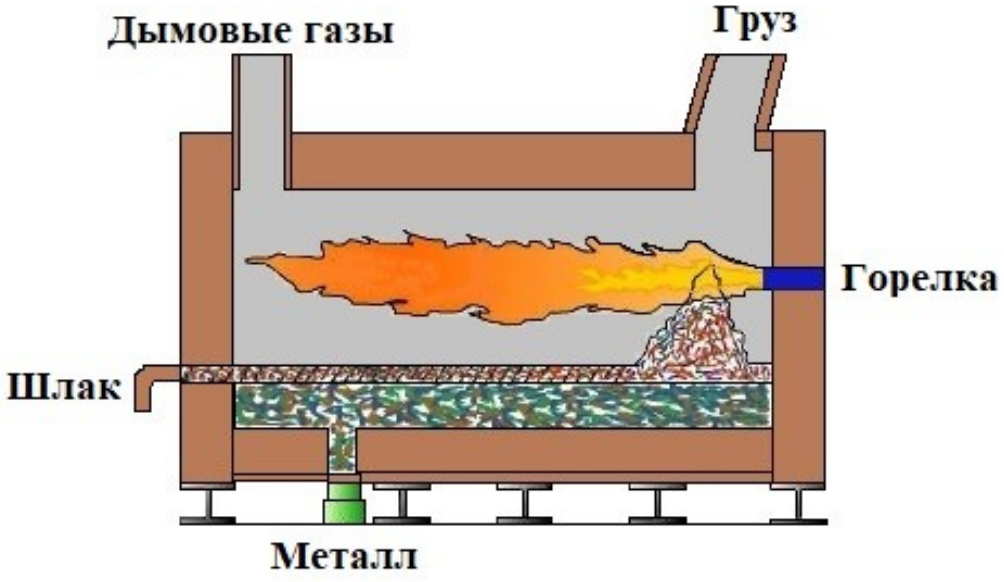


Рисунок 1.9 – Схема отражательной печи

На рисунке 1.10 показана диаграмма потребления энергии (по вкладу) в отражательнной печи за период 5,25 часа.

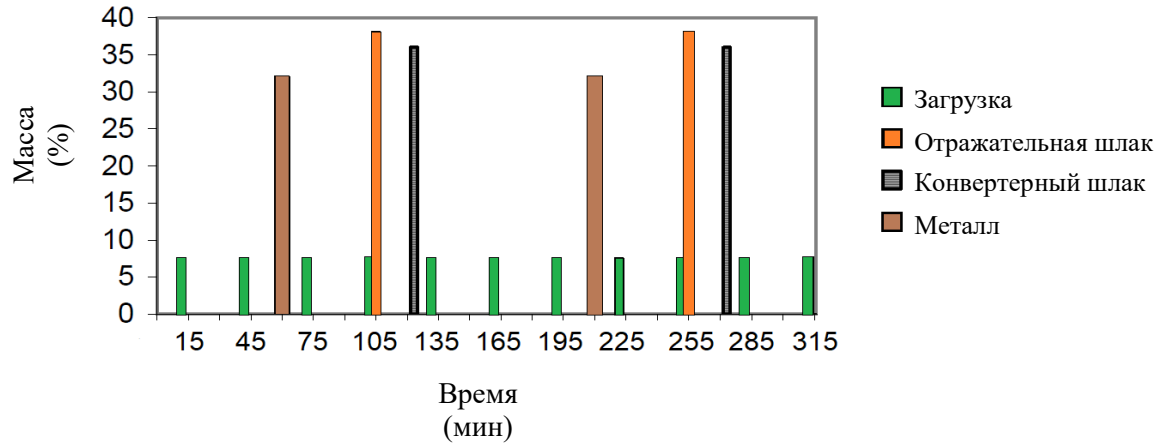


Рисунок 1.10 – Принципиальная схема массового расхода материалов в отражательной печи

На рисунке 1.11 показаны стадии загрузки шихты и ее среднее значение за период 5,25 часа. Они универсальны и их можно применить для других материалов, в приходной и расходной части материального баланса печи.

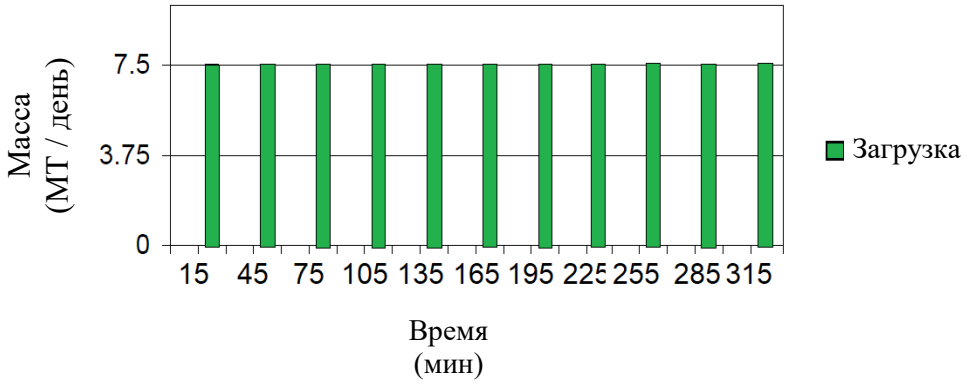


Рисунок 1.11 – Средние значения загрузки материалов и шихты за период 5,25 часа

Поток газов в печь и выход из нее имеет прерывистый турбулентный режим, когда масса в контрольном объеме и высота расплавленных материалов (уровень расплава) меняются со временем. Уравнение баланса энергии для этого контрольного объема шихты и теплового состояния ОП, в этом случае, определяется по формуле (1.6).

$$Q_{cv} + \sum m_i h_i = \sum m_e h_e + \Delta U \qquad (1.6)$$

где $\sum m_i h_i$ – представляет собой сумму энтальпий, поступающих в контрольный объем и состоит из полной энтальпии топлива, явной и скрытой теплоты возвратной во время заливки шлака из печи;

$\sum m_e h_e$ – является суммой энтальпий на выходе из печи, состоящей из ощутимого тепла газа в общей атмосфере печи, теплоты испарения воды и скрытой теплоты штейна и шлака, выходящего из печи;

ΔU – это изменение внутренней энергии в контрольном объеме, состоящее из полной энергии расплава, шлака и топлива.

Общая теплопередача печи и определяется по формуле (1.7).

$$Q_{cv} = Q_{\text{огнеупоры}} + Q_{прогноз} + Q_{потери\ неучтенные} \quad (1.7)$$

где $Q_{прогноз}$ – это прогнозируемые потери тепла, которые могут зависеть от конструкции и условий эксплуатации печи;

$Q_{потери\ неучтенные}$ – это непредвиденные потери тепла, которые представляют собой разницу между Q_{cv} и внутренним теплом, поступающим в печь;

$Q_{\text{огнеупоры}}$ – тепловые потери от всей футеровки печи, включая боковую футеровку, водоохлаждающие элементы, и внешние металлические поверхностные части горелок.

Тепловые потери определяется по формуле (1.8).

$$Q_{\text{огнеупоры}} = Q_{\text{боковая футеровка}} + Q_{\text{поверхность горелки}} + Q_{\text{водосбора}} + Q_{\text{свод}} \quad (1.8)$$

Потери тепла от стенок печи связаны с разной теплопроводностью элементов печи, и по закону теплопроводности Фурье для боковой футеровки печи определяется по формуле (1.9).

$$q_{\text{боковая футеровка}} = kA\frac{T_1 - T_2}{L} \quad (1.9)$$

где k – теплопроводность материала корпуса, (Вт/м·К);

L – толщина плоскости, (м);

A – площадь плоскости, ($м^2$);

T_1-T_2 – температуры, (°C).

Тепловые потери от свода печи включают конвективную теплопередачу в окружающую среду около свода печи, а также кондуктивную теплопередачу, которые определяется по формуле (1.10).

$$q_{\text{свод}} = A\frac{T_1 - T_\infty}{L/k + 1/h_\infty} \quad (1.10)$$

Электропроводность k и коэффициент теплопередачи окружающей среды h_∞ согласуются по общим общепринятым условиям теплового баланса печи ОП.

Тогда, реальная теплота каждого соединения в технологическом процессе определяется по формуле (1.11).

$$H_s = \sum_j n_j \left(\int_{T_0=298}^{T_{r,j}} C_{p,j} dT + \int_{T_{r,j}}^{T_{m,j}} C'_{p,j} dT + \int_{T_{m,j}}^{T_a} C''_{p,j} dT \right) \quad (1.11)$$

где $n_j, T_{r,j}$ и $T_{m,j}$ – количество молей участвующих в реакции, переходная температура и температура плавления компонента *j* в соединении, соответственно;

T_a – температура шихты перед подачей в печь;

$C_{p,j}, C'_{p,j}, C''_{p,j}$ – удельная теплоемкость компонента *j* в каждом состоянии.

Скрытая теплота плавления определяется по формуле (1.12).

$$H_L = \sum_j n_j \left[L_{r,j} + L_{m,j} \right] \quad (1.12)$$

где $L_{r,j}$ и $L_{m,j}$ – переходная теплота и теплота плавления компонента j соответственно. Скрытая теплота шихтовых материалов, попадающих в печь с температурой окружающей среды, равна нулю. Предполагая, что существует периоды равновесия в печи, явная и скрытая теплота выходящего никелевого сплава и шлака определяется с помощью уравнений (1.11) и (1.12), заменяя T_a на T_b. Поскольку для водяного пара и других газов $p > p_{критическое}$, как такового фазового перехода не происходит. Следовательно, скрытая теплота равна нулю.

При расчете внутренней энергии молярная энтальпия образования при температуре 298К - это теплота образования штейна и шлака исходных компонентов. Теплота разложения связана с экзотермическими реакциями в процессе плавки. Анализ теплового баланса отражательной печи, в котором учтены все параметры и соединения, влияющие на процесс и результаты расчетов должны согласоваться с экспериментально измеренными данными.

Расчеты, основанные на рабочих технологических условиях, более точны, чем расчеты для стандартных условий, и это определяется тем, что наиболее важные потери тепла в печи ОП во время огневого рафинирования никеля связаны с потерями тепла из свода печи. Непредвиденные потери тепла могут быть вызваны побочными реакциями или нежелательным количеством и составом флюса. Таким образом, эффекты изменения количества соединений можно проанализировать с помощью программного обеспечения для достижения оптимальных условий плавки.

1.5 Цель и задачи исследований

На основании проведенного анализа литературных данных выявлены основные проблемы для повышения эффективности производства никеля. На актуальность решений улучшения работы печей с точки зрения повышения энергоэффективности указывает необходимость разработки технических решений, связанных с контролем теплового состояния печи ОП на всех стадиях процесса рафинирования никеля. В результате, могут быть выбраны различные варианты энергосбережения, такие как оптимизация параметров футеровки печей, рекуперация энергии из дымовых газов с учетом влияния индикатора - содержания оксида углерода (угарного газа) - CO, и последующая оптимизация конструкции горелки и параметров ее регулирования с учетом содержания метана.

В связи с вышеизложенным, цель диссертационной работы – повышение эффективности контроля и управления тепловым режимом отражательных печей за счет рациональной подачи природного газа через газовые горелки при огневом рафинировании никеля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить аналитическое исследование процесса огневого рафинирования никеля с учетом контролируемых параметров плавки, и провести патентное исследование, существующих технических решений по рациональным энергетическим режимам для устойчивой работы отражательных печей.

2. Изучить влияние состава природного газа на тепловое состояние печи с учетом процесса горения и физико-химического взаимодействия продуктов горения с компонентами расплава никеля.

3. Создать математическую модель с учетом ввода дополнительных контролируемых параметров для управления тепловым состояние отражательной печи для горелок среднего давления при изменении теплотворной способности природного газа.

4. Разработать алгоритм управления газовыми горелками в зависимости от изменений режимов эксплуатации с учетом технологических условий и времени процесса огневого рафинирования в режиме энергосбережения.

1.6 Выводы по первой главе

В главе 1 представлены основные принципы работы газовой отражательной печи для огневого рафинирования никеля, и рассмотрены потери тепла в различные периоды плавки.

Проведен обзор и анализ огнеупорных материалов, используемых для футеровки отражательных печей, и особенности теплоотвода в зависимости от материала температуры расплава.

Проведен анализ кинетики и термодинамических процессов во время огневого рафинирования никеля.

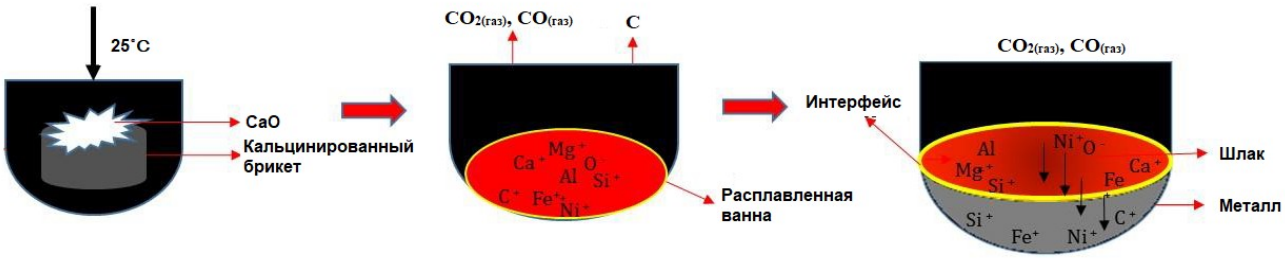
Рассмотрены особенности режимов эксплуатации и тепловой баланс отражательных печей при огневом рафинировании никеля для печей непрерывного и периодического действия для организации дополнительных точек контроля теплового состояния, и управления технологическим процессом в заданных температурных интервалах.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКПЕРИМЕНТАЛНЫХ ИСЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА РАФИНИРОВАНИЯ НИКЕЛЯ В ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

2.1 Технология и методология рафинирования никеля

В качестве объекта исследования выступает технология огневого рафинирования никеля из лимонитовой руды с исходным содержанием никеля около 2%. Предметом исследования является система автоматизированного контроля АСУ ТП производства никеля в отражательных печах. Необходимо рассмотреть и изучить возможные механизмы реакции для определения энергии активации в различное время процесса, для понимания изменения значений параметров плавки в отражательных печах ОП, внесение вклада каждого параметра для эффективного регулирования и управления процессом, и получения сплава с соответствующими характеристиками [67].

С учетом имеющихся производственных данных металлургических предприятий можно выделить комплекс реакций важных мониторинга и контроля процесса [69]. Представляет интерес обработка результатов плавки на никель, в котором преобладают механизмы массопереноса никеля и побочных элементов и соединений, и их диффузии на границе раздела металл-шлака, которые происходят в жидкой ванне печи ОП (рисунок 2.1).



а) б) в)

Рисунок 2.1 – Механизм диффузии никеля и примесей на границе «металл-шлак»

Показан механизм плавления, начиная с комнатной температуры 25°C до образования никеля, который имеет некоторую схожесть с механизмами огневого рафинирования никеля в печах ОП. На рисунке 2.1а представлен переход с образованием пылегазовой смеси (C+CO+CO2), когда после ввода флюса CaO температура начинает повышаться до тех пор, пока не будет достигнуто равновесное состояние расплава между шлаком и металлом (рисунок 2.1 б). В данном случае выделение газообразных фаз можно выбрать индикатором или контролируемым параметром плавки.

Важно помнить, что именно в интервале температур 1450-1500°C происходят химические реакции, такие как образование активного газа (CO(г)), никеля, и некоторых силикатов, таких как диопсид из-за присутствия CaO. Указанные реакции происходят на этой стадии, поскольку при этих температурах повышается извлечение металла, и происходит

разделение шлаковой составляющей от металла. Контроль хода процесса при помощи дополнительных параметров в этот промежуток времени дает достоверную информацию для управляющих воздействий при регулировании параметров (температуры, скорости подачи газа, изменение содержания воздуха), которые обязательно должны происходить до тех пор, пока сплав не будет полностью сформирован. На рисунке 2.2 представлена диаграмма фазовых переходов в атмосфере печи и в расплаве.

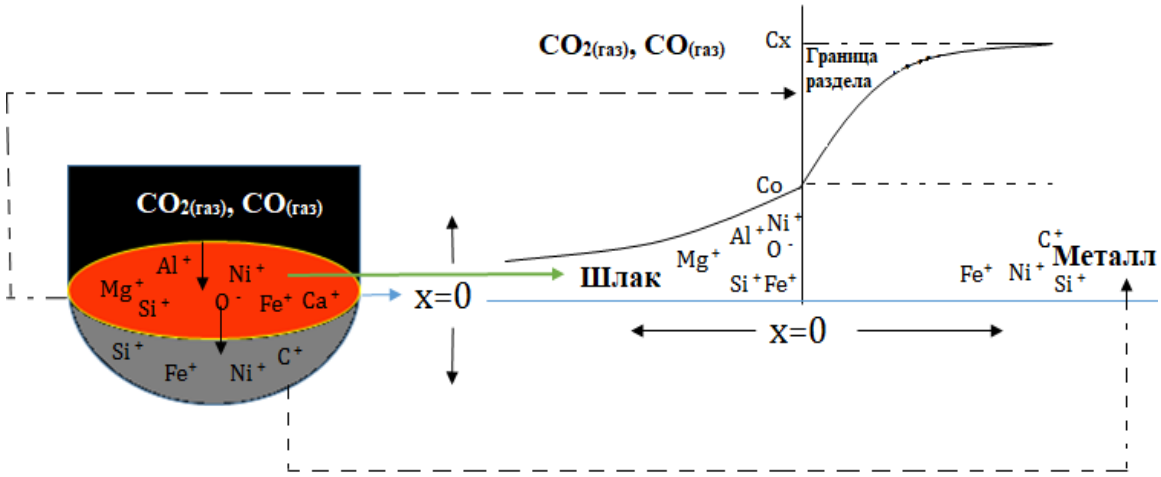


Рисунок 2.2 – Диаграмма процесса плавления и профили концентрации

Показаны предполагаемые профили изменения концентрации в процессе плавки латеритной никелевой руды, в которой всегда присутствует железо и кобальт [13]. Наблюдается граница раздела, расположенная на расстоянии x = 0. Металл отделяется от шлака в указанной точке границы раздела, которая может контролироваться по времени (таймингом) как начало процесса разделения шлака и металла в ванне печи.

Шлак образуется на поверхности металла, и такие элементы, как углерод и кремний, часто переходят в металл в ходе протекающих реакций на границе раздела. Магний, алюминий, кремний и кальций могут остаться в форме оксидов, и в большинстве случаев из-за недостаточно высокой температуры переходит в шлаковую составляющую. Над расплавом наблюдается образование газов, таких как монооксид и диоксид углерода, образующихся в результате реакции кислорода из атмосферы и углерода из свода. Концентрацию газов и их температуру необходимо контролировать в ходе всего процесса плавки [47].

С повышением температуры остаточный углерод, присутствующий в продукте восстановления, и углерод в тигле вступают в реакцию с кислородом в атмосфере, образуя $CO_{2(г)}$, при достижении температуры 200°C, наблюдается стабильность. $CO_{2(г)}$. При повышении температуры начинается образование $CO_{(г)}$, которое происходит при температуре выше 580°C с ΔG = -0,603 кДж, этот газ является восстановителем, который проходит через частицы оксида

кальция, воздействуя на оксид железа (FeO), который далее восстанавливается до металлического железа.

Согласно реакции Белла-Будуара, $CO_{(г)}$ получается в результате реакции $CO_{2(г)}$ с избыточным углеродом, который, также может в лабораторных условиях появляться в результате выделения углерода из графитовых тиглей, в которых происходит процесс плавления материала. На этой стадии оксид железа начинает разлагаться при температуре 722,34°C и ΔG = -0,512 кДж [108].

При 1000°C происходит полное образование $CO_{(г)}$, и наибольшее количество FeO восстанавливается до металлического железа, стабильность этих двух частиц наблюдается выше 1000°C.

При температуре 1450°C, когда начинается разделение фаз (металл-шлак), и как показано на рисунке 2.2, предполагается, что происходит несколько реакций, которые достигают равновесия, но вызывают начало других, поэтому можно принять, что на границе раздела проходит постоянная реакция, ход которой можно контролировать.

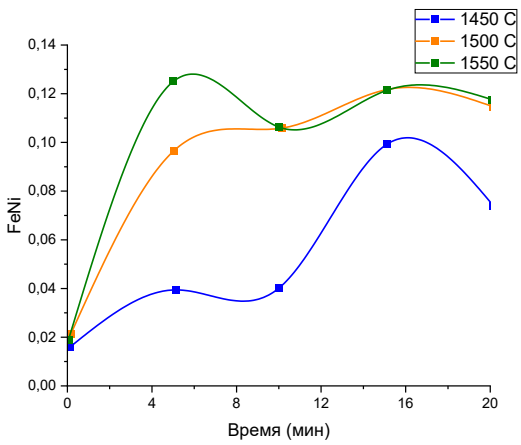
При диссоциации происходит не только процесс ионнообмена в шлаке, но и начинается образование сплава, генерирующего никель (никелевый сплав). Чтобы описать кинетику процесса плавления шихтовых материалов, была проведена корреляция трех переменных, взятых из разработанного плана эксперимента по составу, температуре и времени.

На рисунке 2.3 а показано, что концентрация никеля со временем уменьшается, а иногда и повышается.

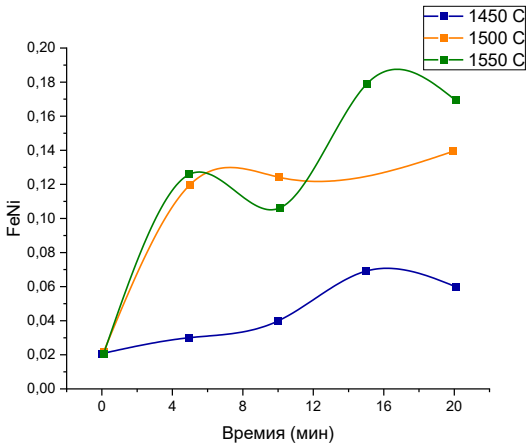
На рисунке 2.3 б показана концентрация никеля. Так же, как и для образца 1, видно, что это не линейная кинетическая зависимость.

На рисунке 2.3 в показана концентрация никеля для образца 3, демонстрирующая подобное поведение, что и для двух других образцов.

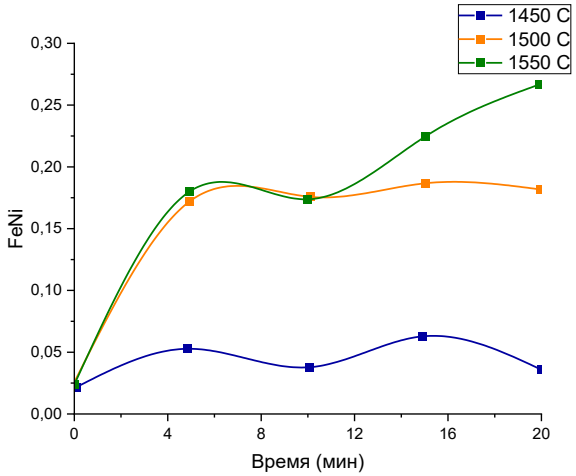
Видно, что концентрация никеля напрямую зависит от температуры, это служит основанием, что для адекватного контроля процесса необходим ввод дополнительных параметров. Концентрации по времени не являются линейными, и это означает, что существуют предпосылки для моделирования сложных процессов касательно процесса плавки никелевых сплавов в отражательных печах, при помощи существующих, и разработанных в соответствии с дополнительными параметрами новых программных пакетов, что входит в одну из задач исследования.



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Кинетические зависимости изменения концентрации никеля в металлической фазе, полученные при 1450°С, 1500°С и 1550°С по времени
а) для образца руды с 2,0 % никеля, б) для образца руды с 1,78 % никеля и в) для образца руды с 1,42 % никеля

2.2 Современные способы моделирования технологических процессов для повышения эффективности на примере газовой отражательной печи

В настоящее время моделирование и имитационные способы являются незаменимыми видами технической деятельности при анализе и проектировании многопрофильных систем в металлургической промышленности.

Для проектирования систем контроля, анализа и диагностики сложных инженерных систем необходима разработка новых программ с вводом цифровых индикаторов, указывающих на состояние текущей технологической ситуации и ее прогноз.

Программное обеспечение должно провести окончательную оценку до того, как будут построены системы АСУ, так как они могут уменьшить необходимость в дорогостоящих экспериментах и поддержать все этапы проекта от концептуального проектирования до сборки и эксплуатации. Некоторые из решений полезны для повышения процесса производства никеля и его сплавов в отражательных печах, поскольку он происходит при высоких температурах в химически агрессивной среде при наличии контролируемых и неконтролируемых параметров.

Численное моделирование процесса

Численное решение дифференциального уравнения является важным элементом численного моделирования в металлургическом процессе. Есть несколько способов найти решения численного приближения для дифференциальных уравнений, которые описывают ход процесса производства никеля [63]. В основе методов лежит идея замены дифференциальных уравнений разностным уравнением. Метод Эйлера основан на приближении производной разностью первого порядка. Существуют более эффективные методики, такие как Рунге-Кутта и многоступенчатые методы, которые наиболее приемлемы для исследования. Численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений и алгебро-дифференциальных уравнений, и в нашем случае может быть применено в виде адекватного алгоритма, с новой структурой кода, где алгоритм и ошибка управления разделены. Алгоритмы для таких алгебраических уравнений еще не так хорошо применяются в металлургии, как алгоритмы для обыкновенных дифференциальных уравнений [68].

Аналоговое цифровое моделирование было начато Селфриджем [81], который продемонстрировал, как цифровой компьютер может имитировать дифференциальный анализатор, своеобразный прообраз цифрового двойника. Такой подход привел к появлению множества языков программирования. В этой среде был разработан стандартный CSSL, который объединил концепции и языковые структуры доступных программ моделирования.

Развитие в этом направлении стало возможным только с появлением высокопроизводительных компьютеров, на которых ПК с растровой графикой стали общедоступными, и применялись для проектирования систем АСУ ТП в черной металлургии.

Митчелл и Готье представили средство графического моделирования ACSL в 1993 году или SIMULINK, который применялся для первых разработок в АСУ ТП.

BDSP (программа моделирования блок-схем) - это программа моделирования, используемая в среде Windows, разработанная Университетом Гифу. Она предлагает библиотеку, которая охватывает широкий спектр физических областей и приложений, облегчающих построение моделей. В этой программе есть процедура для идентификации моделей на основе экспериментальной оценки их передаточной функции. Частично данная

программа в исследовании применена для разработки алгоритма и блок схемы управления потоком природного газа горелок среднего давления в отражательных печах.

В данном исследовании использовался SIMULINK (первоначально называвшийся SIMULAB), который интегрируется с MATLAB, появился в 1991 году. Он был специально разработан для работы с блок-схемами с использованием MATLAB для анализа динамических систем. Блок-схемы SIMULINK можно определить как уравнение состояния процесса огневого рафинирования для каждой стадии по времени и по температурному интервалу с учетом физико-химических превращений в каждом периоде плавки. Затем можно использовать функции MATLAB для численного моделирования и решения или обрабатывать их по-разному. Таким образом можно получить передаточную функцию, диаграмму Боде и т.д. Программа очень полезна в области автоматического управления металлургическими процессами, и в работе случае она тоже использовалась для создания самого ПО [48].

Специальные симуляторы в виде физических моделей (печь и система газоходов и ГОУ) имитируют производственную среду, которая очень проста в использовании, ограничивая область применения модели. Изначально эти программы охватывали только одну отрасль техники. Некоторые инструменты этого типа: система SPICE, которая была разработана для аналоговой модели электрической цепи, и DADS, разработанная в Университете Айовы (1984), для моделирования механических систем [50].

Наиболее приемлемой для исследования изменяющихся потоков природного газа горелок в печи ОП (температура подачи, давление газа, содержание воздуха и метана) является программа Hysys, предназначенная для динамических расчетов в области олеогидравлики, которая включает четыре четко определенных подпрограммы для нелинейного моделирования схем электрогидравлического регулирования [36]. Каждая подпрограмма, доступная для практического применения, позволяет моделировать различные типы систем:

1) HYVOS: приводы, относящиеся к линейному приводу, управляемому клапаном.

2) HYDRA: приводы, относящиеся к поворотному приводу, управляемому клапаном.

3) HYSTA: гидростатические приводы

4) HYSEK: приводы с вторичным регулированием

Преимущество программы Hysys, в нашем случае, заключается в простоте использования при условии, что разработанная модель может быть отнесена к одной из четырех подпрограмм по условиям и дополнительным контролируемым параметрам. С помощью этой программы проводился анализ управления клапанами природного газа, воздуха и кислорода в горелках среднего давления отражательной печи.

Компьютерное инженерное моделирование (Computer Aided Engineering - CAE) это инструмент, который помогает в разработке и улучшении продуктов программирования. С

помощью этой программы были выполнены различные анализы, такие как: статический, динамический, жидкостный, термический, электромагнитный и акустический (шумовой) анализ, касательно производства никеля в печах ОП. Эта аналитика имеет такие преимущества, как сокращение времени на подготовку проекта, повышение производительности, простота обнаружения ошибок, что помогает в поиске решений при разработке цифрового двойника [32].

Инструменты CAE могут использоваться для различных целей: помощь в подготовке проектов, при анализе оценки продукта, при тестировании наилучшего из возможных, анализе ошибок, адаптации и оптимизации продуктов и оборудования, среди прочего. Методы компьютерного анализа могут быть разработаны с помощью различных методов, наиболее распространенными из которых являются анализ методом конечных элементов (FEA) и вычислительная гидродинамика (CFD) [52].

В настоящее время различные системы CAE доступны на национальном и международном рынках. Например, компания Ansys, ответственная за разработку программного обеспечения для компьютерного моделирования, предлагает решения для различных приложений (вычислительная гидродинамика, строительная механика, электромагнетизм, мультифизическое моделирование). В работе использовали приложение, связанное с гидродинамикой расплава и потоков отходящих газов из печи. Использование этих систем облегчает, в нашем случае, процесс проектирования с учетом ввода дополнительных параметров, поскольку можно заменить большую часть прототипов и лабораторных испытаний виртуальным моделированием, помогая выполнять гораздо большее количество интерпретаций за короткое время и сокращая стоимость проекта. В нашем случае, лицензионная программа ANSYS центра Цифровых технологий использовалась для анализа влияния состава природного газа на теплоемкость отражательной печи [35].

2.3 Построение математической модели процесса горения отражательной печи

Методологический подход данного исследования основан на численном моделировании пространства сгорания газов в атмосфере печи. Численное моделирование в замкнутом объеме изменяющейся системы, являющееся эффективным инструментом в прикладных науках, для определения решений и прогнозирования их поведения, не прибегая к экспериментам, позволяет нам математически моделировать физические и химические процессы внутри печи, а также оценить динамическое влияние параметров на сам процесс на всех стадиях [10].

Для выполнения этой задачи данные были взяты из литературы открытого доступа. Этот итеративный процесс создает надежную и полную модель печи, способную моделировать состояние печи, а также чрезвычайно полезную для воспроизведения гипотетических сценариев во время плавки никелевых сплавов [39].

Рисунок 2.4 представляет собой исходную расчетную схему, которая показывает взаимодействие между принципами при моделировании.

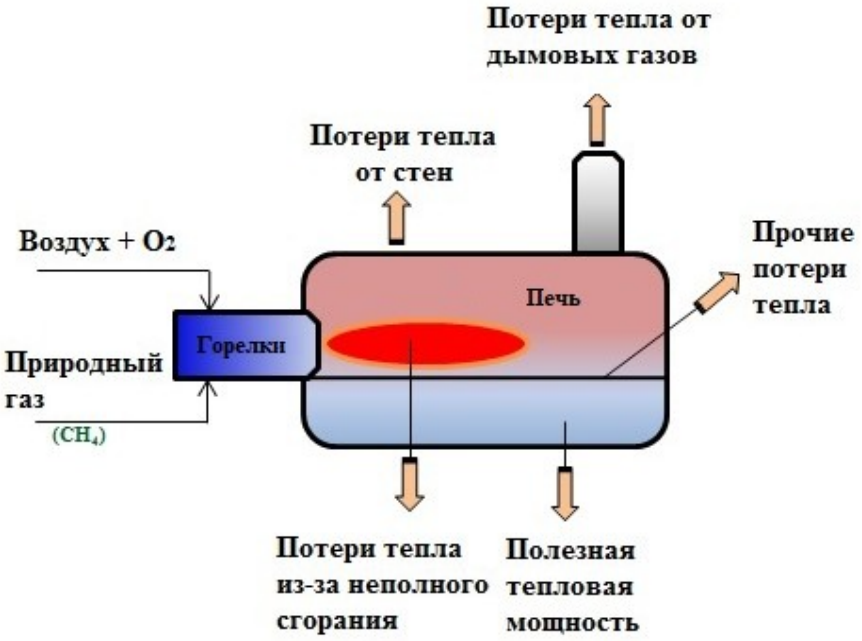


Рисунок 2.4 – Схематическое изображение баланса энергии в никелевой отражательной печи [98]

Отражательные печи для плавки никеля и сплавов в основном используются для производства никеля из сырья, которое затем превращается в расплав. В этих процессах синтеза выделение тепла от сгорания природного газа передается металлу за счет теплового излучения и конвекции (излучения). Это зависит от локальных свойств потока природного газа, а именно параметров: давления, температуры и скорости [105]. Распределение теплового потока на поверхности металла напрямую влияет на скорость, с которой происходит плавление шихты, и, следовательно, на скорость получения готового никеля. Кроме того, температура газа и локальное распределение теплового потока в пространстве его сгорания в ванне печи также влияет на выработку оксидов углерода, азота и других загрязняющих веществ [38].

Качество использования и распределения энергии в пространстве сгорания печи имеет первостепенное значение, поскольку это позволяет нам увеличить производительность и уменьшить образование загрязняющих веществ и газообразных продуктов горения. В этой связи, сложные процессы моделирования при производстве никеля в ОП подразделяются на два основных этапа: (1) расчет потока сгорания топлива и (2) расчет потока излучения (лучевая и тепловая энергия) от поверхности расплава.

Природный газ является источником ископаемой энергии, который имеет множество преимуществ, среди которых: его низкая стоимость и минимальный выброс вредных веществ в окружающую среду при его сжигании в горелках.

В процессах сгорания химическая энергия преобразуется в тепло путем нарушения связей углеводородных соединений и самого углерода в природном газе. Это сложный процесс, при котором образуются вредные продукты сгорания, такие как CO2, CO, NO, в присутствии частиц сажи, среди прочих. Формирование всех соединений требует применение современных вычислительных ресурсов и времени для их расчета. В данном исследовании акцент направлен на физические особенности процесса горения, при этом число химических уравнений учитываем как можно меньшим, чтобы моделирование можно было завершить в основных доступных программах.

Комплексная модель горения топлива используется для описания реакций различных типов с учетом скорости тепловыделения.

Поток, транспорт или генерация компонентов природного газа могут быть описаны с использованием основных уравнений. Эти уравнения обычно называют уравнениями непрерывности, импульса, энергии и концентрации частиц [83]. Свойства потока, подлежащие разрешению, включают компоненты скорости в направлениях x, y и z, давления, энтальпии, температуры, плотности и сохранения химических веществ. Необходимо также учитывать и включить уравнение состояния идеального газа в нашу систему уравнений. Для простоты перечислим и учтем в расчетах основные уравнения в двух измерениях.

Уравнение состояния идеального газа принимаем как начальное условие, которое определяется по формуле (2.1).

$$p = \rho RT \sum_i \frac{f_i}{w_i} \tag{2.1}$$

где $\rho -$ плотность газа (отходящих газов).

Уравнение неразрывности газа, как постоянное условие, которое определяется по формуле (2.2).

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}(\theta \rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\theta \rho v) = \frac{dm}{dt} \tag{2.2}$$

где $\rho -$ плотность газа;

$u -$ скорость компонента в направлении *x*;

$v -$ скорость компонента по реакции в направлении *y.*

Уравнение x-импульса газа, определяется по формуле (2.3).

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\theta \rho u u - \mu_e \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\theta \rho v u - \mu_e \frac{\partial u}{\partial y}\right) = \rho g_x - \theta \frac{\partial p}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial x}\right) \tag{2.3}$$

где $\mu -$ вязкость;

$g_x -$ускорение свободного падения в *x;*

$\mu_e = \mu_t + \mu$; $\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}$.

Уравнение y-импульса газа от газовых горелок, определяется по формуле (2.4).

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\theta\rho uv-\mu_e\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\theta\rho vv-\mu_e\frac{\partial v}{\partial y}\right)=\rho g_y-\theta\frac{\partial p}{\partial \mathrm{y}}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mu_e\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\mu_e\frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (2.4)$$

где g_y −ускорение свободного падения в *y*.

Уравнение энтальпии газа для теплового расчета, определяется по формуле (2.5).

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\theta\rho uh-\frac{\mu_e}{\sigma_h}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\theta\rho vh-\frac{\mu_e}{\sigma_h}\frac{\partial u}{\partial y}\right)=S_h \quad (2.5)$$

где $h-$ энтальпия.

Уравнение переноса турбулентности *k* (многофазное) для расчета распределения газовых потоков в среде ANSYS, определяется по формуле (2.6).

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\theta\rho uk-\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\theta\rho vk-\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)=\theta\rho\mu_t G_\mu-\theta\rho\varepsilon-S_{k,s} \quad (2.6)$$

где $k-$ теплопроводность; $\varphi-$ функция рассеяния;

$\sigma_k=1;\ G_\mu=2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2\right]\ +\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\ +\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\ \right]^2;$

$S_{k,s}=\int_0^\infty\frac{4}{3}\pi r^3\left[\frac{\partial}{\partial x}(gu_sk/\varphi^2)+\frac{\partial}{\partial y}(gv_sk/\varphi^2)\right]dr;$

$\varphi(r)=1+2r+0{,}06r^2.$

Уравнение переноса турбулентности ε (многофазное), принимается как характеристика всей изменяющейся во времени атмосферы печи, и определяется по формуле (2.7).

$$\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\theta\rho u\varepsilon-\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{x}}\right)+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\left(\theta\rho v\varepsilon-\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathrm{y}}\right)=C_1\mu_t\frac{\varepsilon}{k}G_\mu-C_2\theta\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.7)$$

где эмпирические турбулентные константы $C_\mu=0{,}09;\ C_1=1{,}45;\ C_2=1{,}93;\ \sigma_k=1;\ \sigma_\varepsilon=1{,}4.$

Излучение, как параметр, является важным показателем передачи тепла от камеры сгорания к сплаву. Тепло излучается в печи ОП, и далее поглощается и рассеивается в виде волн разной длины. Если предположить, что эффект рассеяния незначителен, то радиационная теплопередача становится показателем баланса мощности излучения и поглощения. На каждой длине волны локальная чистая мощность излучения рассчитывается путем интегрирования поглощенной энергии, поступающей из всех других мест печи, и вычитания локально излучаемой энергии от газовых горелок. Тогда уравнение переноса излучения получается при интегрировании чистой мощности излучения для всех типов и длин волн, и определяется по формуле (2.8).

$$q_r(x,y,z)=\int_0^\infty\left\{\left[\oint k'_\lambda e'_{\mathrm{b}\lambda}(T')e^{-\int k''dl''}dv''\right]-k_\lambda\ e_{\mathrm{b}\lambda}(T)\right\}\mathrm{d}\lambda \quad (2.8)$$

где λ, k и l – длина волны, объемная поглощающая способность и оптическая длина соответственно;

$e_{\mathrm{b}\lambda}(T)$ – спектральная излучаемая мощность черного тела.

Расчет расхода теплоты сгорания сложен, поскольку очень чувствителен к изменениям значений давления и плотности природного газа в горелках. Чтобы облегчить эту процедуру цифровой трансформации, вызванную в значительной степени несопоставимыми масштабами химической реакции и самого потока, принята двухступенчатая схема расчета с разделением. Схема делится на две группы вариантов, в которых выполняется расчет потока в два этапа. Варианты, которые оказывают влияние на плотность природного газа, группируются как основные виды, а остальные - как второстепенные виды (или подвиды). Два этапа расчета газового потока:

1) расчет скоростей газа, энтальпии (или температуры), турбулентных свойств и переноса основных частиц с использованием сокращенной глобальной реакции процесса огневого рафинирования,

2) расчет переноса инноварианта с использованием более подробной кинетики и рассчитанных полей потока и температуры из этапа 1.

Расчет радиации проводим в тот период, когда тепло излучается, и далее поглощается и рассеивается горячими частицами горения в волнах разной длины. Металл и стены печи также поглощают и излучают энергию. Если пренебречь рассеянием излучения, радиационная теплопередача становится балансом между мощностями излучения и поглощения. Для каждой длины волны локальная чистая мощность излучения получается путем интегрирования поглощенной мощности из всех других местоположений и вычитания излучаемой мощности локальной вычислительной ячейкой. При сжигании углеводородного топлива активной средой, участвующей в излучении, являются продукты сгорания: диоксид углерода (CO_2), пар (H_2O) и сажа, которая вносит важный вклад в излучение.

Порядок создания математической модели печи можно увидеть на блок-схеме на рисунке 2.5.

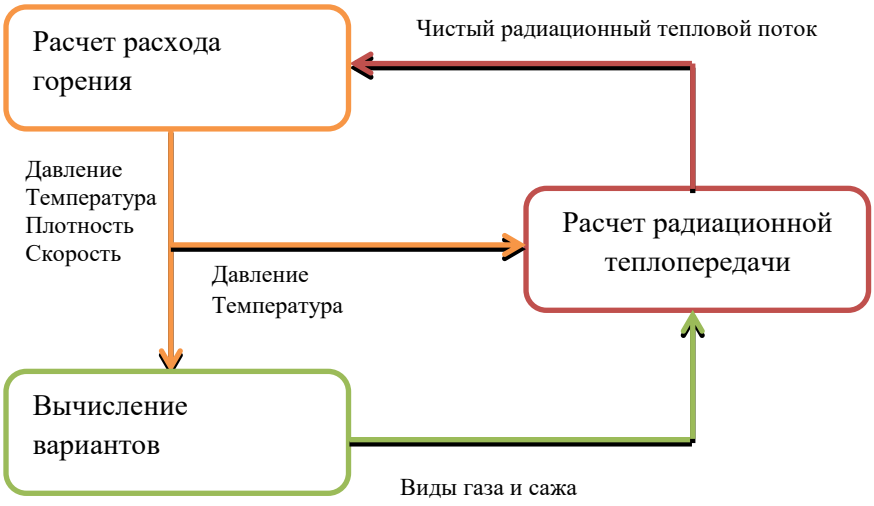


Рисунок 2.5 – Общая диаграмма для моделирования печи

Пар имеет пять значительных типов спектров поглощения, а диоксид углерода - шесть полос. Излучение сажи пропорционально ее доле в локальном объеме, и обратно пропорционально длине волны. Сажа образуется в концентрированных топливом областях из-за крекинга и сжигание его кислородом.

2.4 Пример CFD моделирования процесса горения отражательной печи

Моделирование гидродинамики (CFD) – это численный инструмент, используемый для моделирования физико-химических явлений, таких как движение потока, теплопередача, массообмен, химические реакции и т. д. Точечные значения переменных для моделирования (температура, расход, концентрация, скорость и т. д.) могут быть получены в любой точке, отмеченной в моделируемой области [17].

Исходя из вышесказанного, при моделировании учитывались горючие твердые и газовые частицы, такие как NO_x, сажа, CO, CO_2, H_2O. Кроме того, был исследован анализ различной геометрии всего внутреннего объема печи, расположения горелок, скоростей сгорания, типов горелок (например, горелок с холодным обогревом по сравнению с регенеративными), объемов пространства сгорания. Были изучены различные сценарии, включая аварийный режим [19]. Результаты моделирования показаны на рисунке 2.6. Видно, что распределение температуры печи, наложенное на поле скоростей изменяется вор времени, даже в небольшой области в нижней части графика x-y. Необходимо указать на особенности всей схемы циркуляции газового потока в печи, а также то, как быстро энергия теряется через дымоход, который расположен непосредственно между двумя топочными горелками среднего давления.

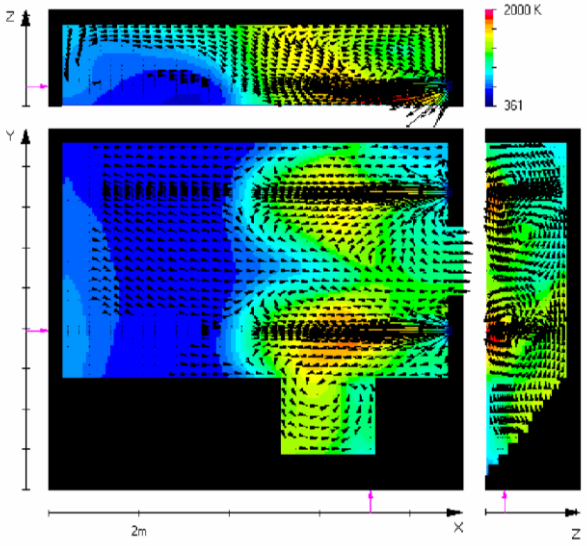
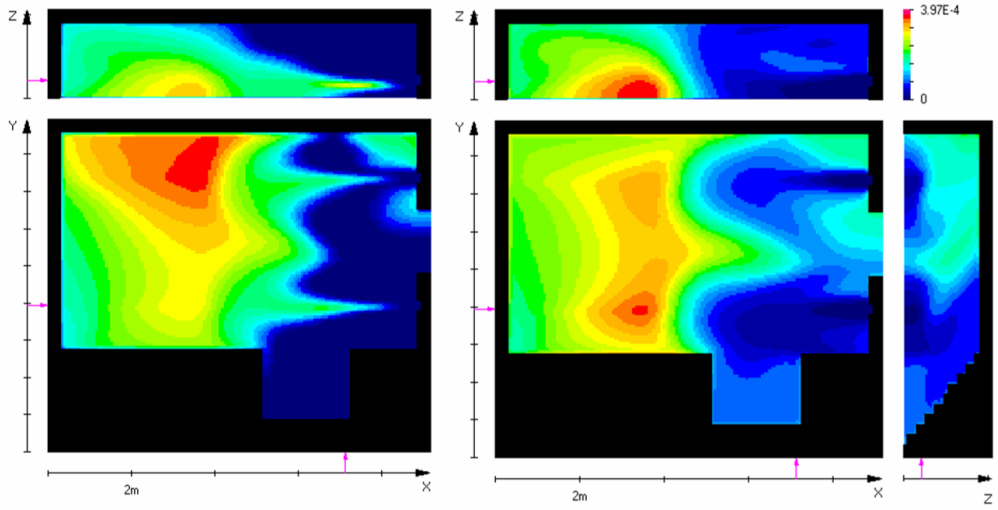


Рисунок 2.6 – Расчетная модель газового потока при изменении температуры и скорости для отражательной печи

Для примера, на рисунке 2.7 также показано распределение сажи и NOx в печи, которые также необходимо учитывать и контролировать, поскольку они оказывают влияние на тепловой баланс печи [84].



(а) (б)

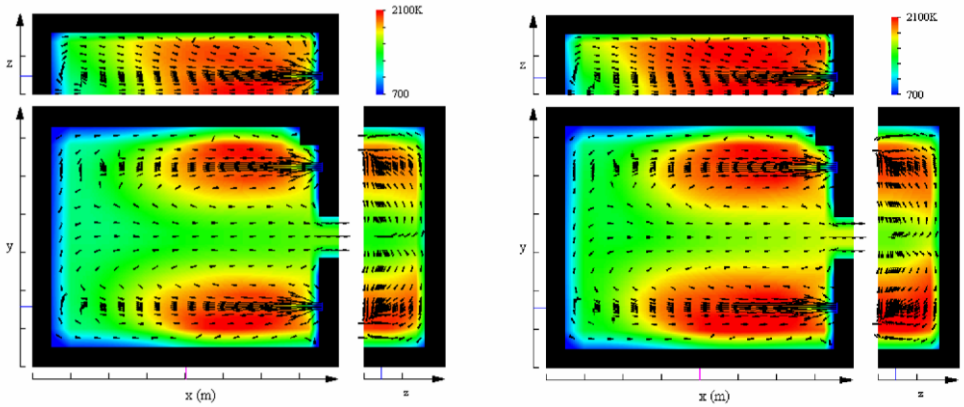
Рисунок 2.7 – Распределение сажи (а) и NO_x в отражательной печи (б)

Установлено что, сажа является важным фактором передачи энергии от пламени металлической нагрузке, по причине своего значения теплоемкости. Когда молекулы элементарного углерода в саже разрушаются во время горения, выделяется излучение (тепло), которая передается непосредственно к расплаву как источник энергии. Информация распределения этого источника энергии может оказаться полезной, как дополнительный параметр, при настройке печи на КПД [14].

Также интересны другие расчетные уровни, связанные с NO_x. Хотя в печи уровни NO_x ниже стандартов качества воздуха т.е. они соответствуют действующим стандартам и нормам качества воздуха для выбросов, поэтому, возможность прогнозирования уровней NO_x в сочетании с заменой горелки и изменениями геометрии печи также является полезной для расширения функций контроля [11] .

Учитывая общие условия формирования газовых потоков и изменений в атмосфере печи, была разработана тепловая модель процесса в замкнутом контуре по геометрии печи с учетом работы 2-х горелок для изучения сценариев технологического процесса. Затем были изменены различные участки в геометрии печи, чтобы определить влияние этих изменений.

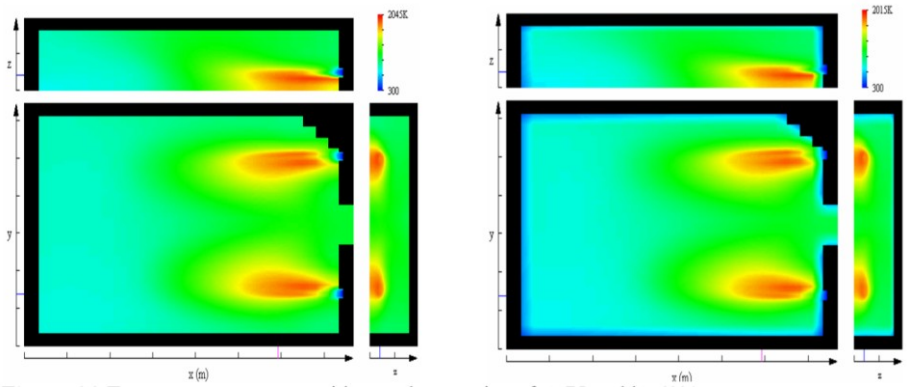
На рисунке 2.8 показано влияние изменения количества воздуха, подаваемого для горения на передачу тепла на поверхность расплава никеля.



(а) (б)

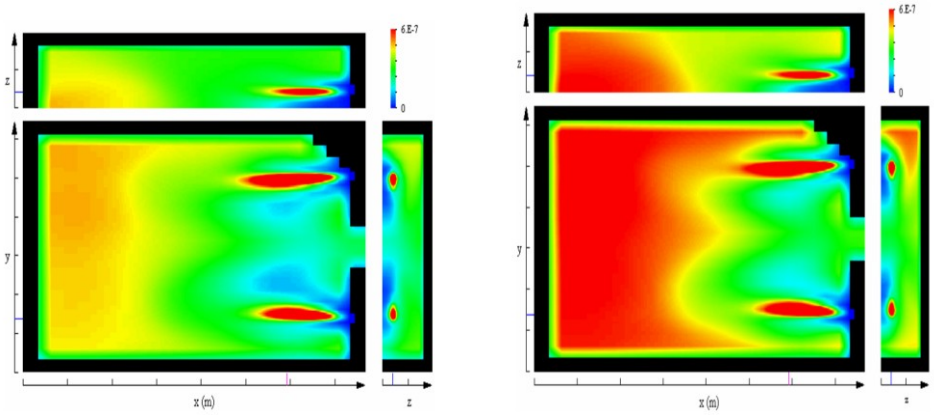
Рисунок 2.8 – Сравнение эффектов изменения температуры воздуха для горения при температурах (а) 80°C и (б) 200°C

На рисунках с 2.9 по 2.11 показаны результаты для типичной геометрии печи при изменении мощности горелок и температуры горения.



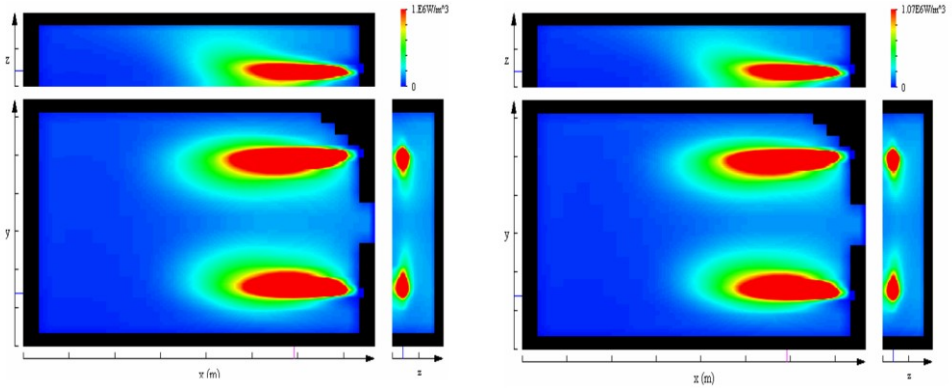
(а) (б)

Рисунок 2.9 – Температурные контуры при изменении давления газа с коэффициентами корректировки (а) 75% и (б) 60%



(а) (б)

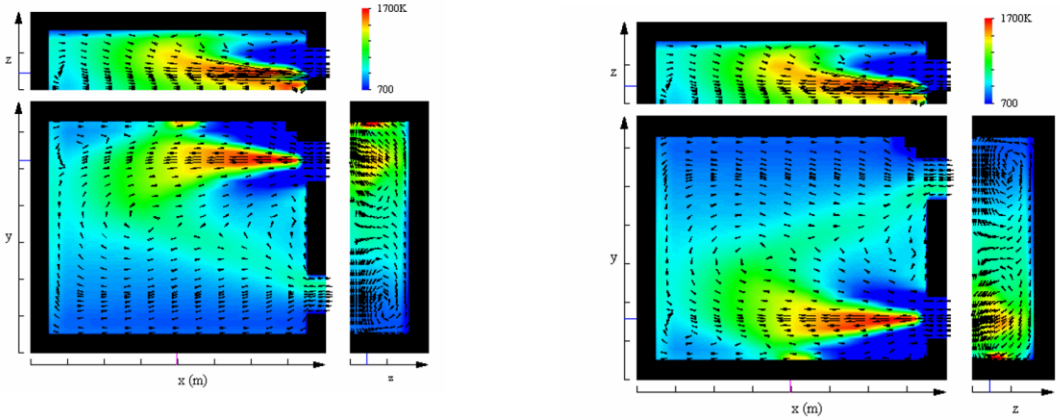
Рисунок 2.10 – Профиль концентрация сажи при изменении уровня регулирования воздуха (а) 75% и (б) 60%



(а) (б)

Рисунок 2.11 – Излучательная мощность при коэффициентах уменьшения (а) 75% и (б) 60%

Видно, что изменяется концентрация сажи по причине неполного сгорания топлива, и изменение излучательной мощности, по этой же причине. Отражательные печи также могут иметь рекуператоры отходящих газов, которые используются для регенерации газов и утилизации некоторой энергии от горения для частичного подогрева воздуха и осушки природного газа от влаги [3]. Как показано на рисунке 2.12, в печи есть два отверстия для газовых горелок, которые можно переменно переключать и перекрывать. Во время работы одно отверстие используется как горелка, а другое - как вытяжка. Через заданные промежутки времени источник переключается на другую горелку, в то время как первая горелка становится участком выпуска. При моделировании предполагается квазистационарное состояние газовой системы печи [106]. Выполняются два расчета, которые затем усредняются для общих свойств газового потока, в котором кроме изменения теплового баланса происходят процессы с изменением вещественного состава в зависимости от заданных условий (концентрация воздуха и метана, давление газа, температура нагрева) [21].



(а) (б)

Рисунок 2.12 – Изменение температуры и скоростей потока газов в отражательной печь при переменной работе горелок: (а) работа левой горелки и (б) работа правой горелки

Чтобы проверить полученные результаты на адекватность, были проведены сравнения с моделируемой температурой расплава, и измеренной температурой расплава. На рисунке 2.13 представлены эти значения, из которых можно увидеть, что существует хорошее соответствие между измеренным значением и расчетным значением, и, следовательно, модель можно считать точной в пределах исследуемых температурных интервалах. Последним этапом моделирования было выполнение серии опытов для определения величины изменяющихся параметров, таких как коэффициенты отклонения, угол наклона горелки, перемешивание расплава и шлака, и другие операции, входящие в технологический регламент плавки в отражательной в промышленной печи и ее физической модели [12].

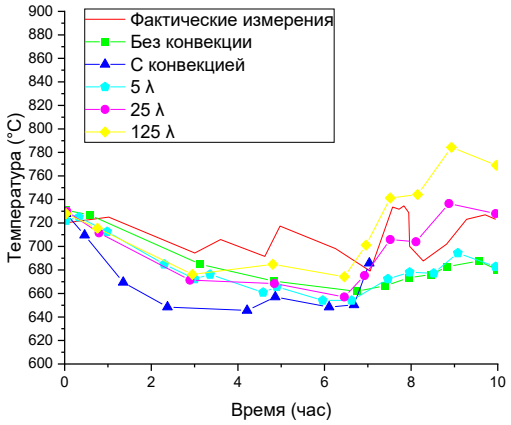


Рисунок 2.13 – Зависимость изменения температуры расплава физической модели в различных условиях

В нашем случае, моделирование процесса горения – это только половина полной задачи моделирования теплового состояния (баланса) печи. Вторая половина модели – параметры регулирования и влияние состава природного газа в процессе горения на тепловое состояние отражательной печи [25] . С помощью 3D - модели математической модели можно более точно описать процессы горения в отражательной печи (рисунок 2.14) [21].

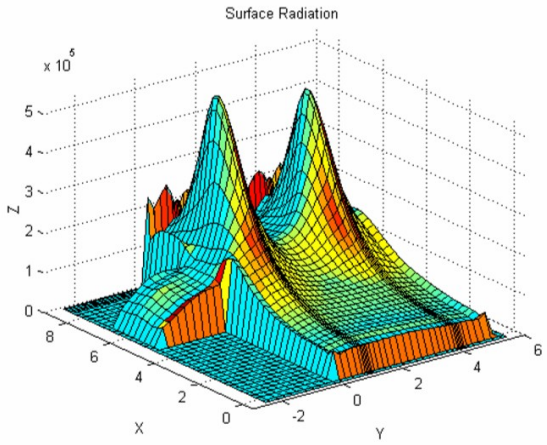


Рисунок 2.14 – Трехмерная математическая модель излучения с поверхности расплава

Экспериментальные данные, которые можно использовать для проверки кода, включают температуру дымовых газов, скорость, концентрацию частиц газа и температуру стенок печи. Для заданных условий эксплуатации была проведена проверка результатов моделирования, которые сравнили с измерениями по промышленным данным и физической модели, чтобы определить их достоверность [89]. На рисунке 2.15 показаны расчетные значения температур дымовых газов в зависимости от потребляемой мощности горелки, представленной как отношение мощности и площади поверхности расплава (час/см^2).

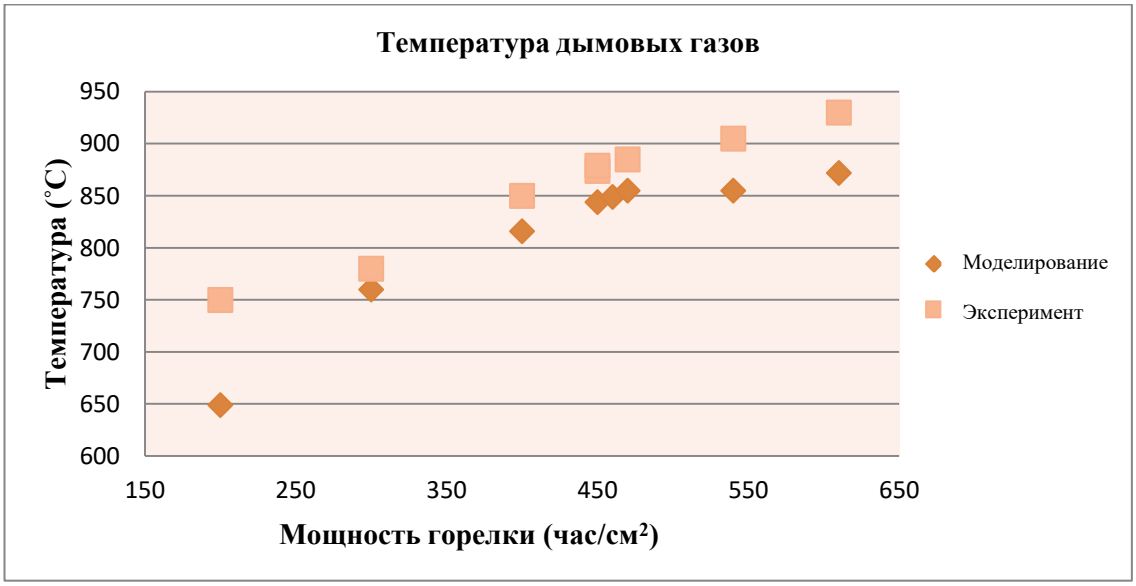


Рисунок 2.15 – Сравнение расчетных и измеренных данных температуры дымовых газов для рабочих условий печи

Можно отметить, что за исключением двух точек для всего ряда данных, результаты моделирования хорошо коррелируют с данными эксперимента. При этом необходимо отметить, что температуры дымовых газов в рамках эксперимента были показаниями термопары, когда все компоненты шихты в никелевом расплаве уже были расплавлены, а прогноз модели CFD является стабильным, который в этом случае следует интерпретировать, как показания значений термопар в течение длительного периода времени проведения эксперимента.

На рисунке 2.16 показано сравнение прогнозируемого и измеренного КПД печи в зависимости от потребляемой мощности горелки. Прогнозируемый КПД печи был рассчитан как отношение полезной мощности излучения расплава к общей потребляемой мощности горелки. Измеренный КПД (выход годного металла) печи был рассчитан как отношение фактического значения массы шихты для 1 т расплава к теоретическому расчетному значению массы на 1 т товарного никеля. Можно увидеть что, прогнозные модели довольно хорошо соответствуют общей тенденции, а также величине выхода годного металла, т.е. КПД печи повышается при увеличении мощности горелки [94].

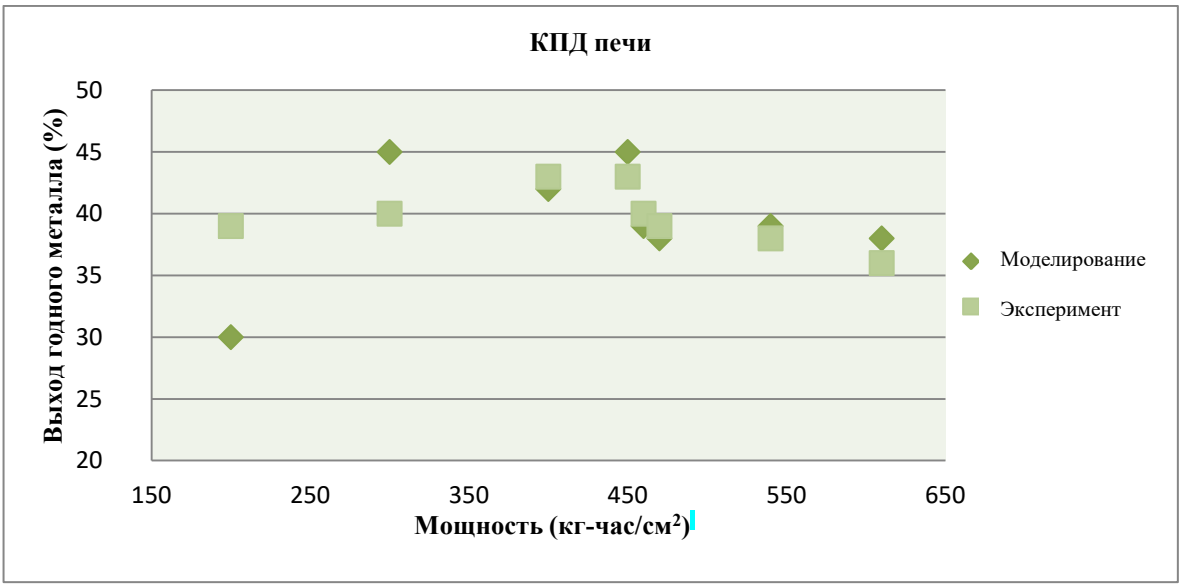


Рисунок 2.16 – Прогнозируемый КПД и фактический КПД печи на основе сравнительной модели

2.5 Выводы по второй главе

В данной главе обсуждались преимущества различных способов математического моделирования и цифровой трансформации, которые можно применить для разработки кинетической модели рафинирования никеля к условиям отражательной плавки.

Определено, что изменение содержания никеля во время плавки не является линейным, а кинетическая модель указывает, на то что, и степень очистки от примесей в расплаве прямо пропорционально зависит от температуры атмосферы отражательной печи.

Предложена математическая модель для проверки на экспериментальных исследований и CFD моделирование процесса горения природного газа в отражательной печи с помощью програмного пакета Ansys.

Проведен анализ теплового состояния печи при помощи разработанной модели теплового поля для определения рабочих условий, которые повышают энергоэффективность печи с изменением следующих параметров: размер и расположение дымохода печи и подача природного газа. Высота и ширина дымохода варьировались, чтобы определить оптимальные размеры и расположение дымохода относительно печи. Эти параметры влияют на общее время пребывания горячих газов в печи, для контроля передачи тепла стенкам печи и к расплаву. Отмечается, что существует оптимальная вертикальная высота и ширина дымохода, при которых достигается максимальная теплопередача. Определено, что расчеты необходимо выполнять для каждой конкретной промышленной печи, так как это зависит от конфигурации самой печи, а также от расположения и размера горелок. В нашем случае исследование проводилось с регенеративными горелками среднего давления для природного газа.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ РАФИНИРОВАНИИ НИКЕЛЯ

В отражательной печи основным источником тепла для процессов нагрева, плавления и массообмена являются газовые горелки, работающие на природном газе различного состава и качества. Воздух при сжигании топлива обеспечивает кинетическую энергию для создания требуемой турбулентности и условий перемешивания, поддерживает горение частиц в состоянии суспензии внутри пламени, и после этого вытесняет газообразные продукты сгорания для поддержания дальнейшей подачи кислорода и сохранения стабильных условий процесса [85].

Конструкция горелки должна определять условия сбалансированного теплового состояния для полноты физико-химических процессов в зависимости от мощности тепловыделения, производительности вентилятора для обеспечения воздуха для горения и кинетической энергии, необходимой для развития полного сгорания и эффектного нагрева и плавления шихты, для получения продукции с максимальным выходом годного металла.

При разработке мероприятий по энергосбережению, необходимо при сжигании топлива учитывать методы регулирования воздушного потока в соответствии с содержанием метана и других компонентов. Требуемая теплота сгорания природного газа обеспечивается соответствующей конструкцией горелки для выпуска газа, его смешиванием и транспортированием к шихте для обеспечения полноты кинетических реакций. Дополнительные параметры для контроля и управления газовыми горелками отражательной печи позволяют повысить эффективность работы самой АСУ ТП.

3.1 Изучение влияния состава природного газа на тепловой КПД отражательной печи

Предлагаемый метод контроля и управления теплом газовых горелок включает в себя анализ состава дымовых газов и температуры дымохода для расчета теплового КПД. При цифровой трансформации в процедуре разработки исходных электронных таблиц BigData (библиотек) использовали стандартные графики избыточного воздуха и значения энтальпий компонентов дымовых газов в атмосфере печи для упрощения расчетов [97].

Чтобы понять описанную процедуру, на первом этапе, рассчитывали параметры и показатели с учетом самой низкой теплотворной способности или величины теплоты сгорания природного газа, и средней температуры воздуха, необходимой для горения в сочетании с показателями рационального расхода дымовых газов. При разработке математической модели изменяли состав газов в заданном контуре объема (с пересчетом на общую массу) с учетом приемного значения теплового КПД печи. Этот метод учитывает анализ состава дымовых газов

и температуры, отходящих в районе дымохода для расчета текущего значения теплового КПД. Описанный способ предназначен только для отражательных печей, работающих с горелками среднего давления на природном газе.

Чтобы понять и обосновать описанную процедуру, рассчитывали следующие параметры и показатели процесса производства никеля в печи ОП:

- низкую теплотворную способность ($Q_н$) или теплоту сгорания топлива,
- температуру воздуха (подогрева) для обеспечения полного сгорания,
- расход дымовых газов для обеспечения полного сгорания,
- состав дымовых газов (на массу перерабатываемой шихты по стехиометрии),
- тепловой КПД печи при стандартных значениях.

Существует несколько способов расчета теплового КПД печи [12], например, на основе 1 закона термодинамики или анализа состава дымовых газов, образующихся в процессе плавления. В нашем случае, основываемся на анализе и выборе характеристик дымовых газов и их температуры по соответствующим реакциям в периоде нагрева. Основные исходные данные исследования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Температуры для расчетной модели дымовых газов

Температура	˚C
Температура сгоревшего газа на выходе	176
Температура окружающего воздуха	15
Температура воздуха для горения	60
Температура продуктов сгорания	25

Содержание кислорода в сжигаемом газе составляло 3,2% в пересчете на сухое вещество. Нормальный расход в течение процесса – 100 моль/ч. Состав природного газа в соответствии с проведенными исследованиями приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Состав природного газа для горелок

Компонент	Формула	Содержание, %
Метан	CH_4	90,08
Этан	C_2H_6	2,14
Этилен	C_2H_4	2,28
Пропан	C_3H_8	0,29
Пропилен	C_3H_6	2,95
Бутан	C_4H_{10}	0,11
Бутилен	C_4H_8	1,06
Пентан	C_5H_{12}	0,04
Азот	N_2	1,94
Монооксид углерода	CO	0,74
Углекислый газ	CO_2	0,39
Сероводород	H_2S	0,0048

Наличие анализа составляющих природного газа на выходе из печи, позволяет использовать Базу данных, как ценную информацию для эффективного контроля за соблюдением условий, обеспечивающих полное сгорание топлива для нагрева шихты в ОП:

1. Показатель O_2 позволяет контролировать наличие восстановительной атмосферы и должна поддерживаться на минимальном уровне.

2. Показатель содержания CO (индикатор) имеет наиболее важное значение , поскольку он служит для проверки того, что сгорание полностью завершено в пределах стехиометрического условия, и может быть принято до значения 1000 ч/мл, чтобы гарантировать условия для полного завершение восстановительных процессов никеля в печи. В газопровод воздух попадет в фильтр, что позволит довести его до полной конверсии в CO_2 перед фильтром.

Взрывоопасное состояние такого газа как CO происходит и существует промежуток времени начиная со значения 2500 ч/млн (0,25%). Необходимо, чтобы индикатор CO отображался на 1 уровне АСУ ТП в ppm (1% = 10000 ppm), при фиксированном тайминге.

3. Показатель NO_x является важным показателем регулирования температуры пламени, более чем контроль выбросов в атмосферу, но записанные значения следует всегда учитывать до тех пор, пока присутствует CO, и после того, как кислород будет удален из NO_x, с переходом молекулярный азот (N_2).

4. Показатель CO_2 важен для контроля развития и полноты всего металлургического процесса, и как фактор его завершения.

5. Показатель SO_x позволит контролировать общий уровень выбросов с учетом стехиометрии по газообразным веществам, которые остаются в атмосфере печи и шлаке.

Схема отражательной печи, основанная на Базе данных (BigData) по расходу газа и воздуха, показана на рисунке 3.1.

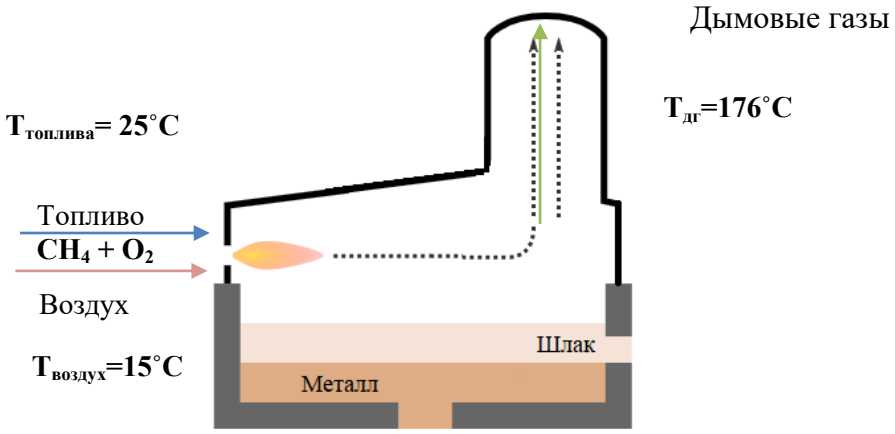


Рисунок 3.1 – Схема отражательной печи с учетом и контролем данных

Исходя из базы данных по содержанию топлива и воздуха для горения, принимая за основу расчет расхода газа для обеспечения горения 100 моль/ч, определим общую массу топлива. После следующих вычислений на первой стадии процесса, находим молярный расход каждого компонента природного газа, умножая его мольную долю на расход газа (100 моль/ч), затем умножаем потоки каждого компонента газа на его соответствующую молекулярную массу и, суммируя, получим общий расход газа.

Тогда, общий расход газа = 816,50 кг/ч.Далее, умножив расход каждого газового компонента на его соответствующую низшую теплотворную способность, и суммируя все теплотворные способности, разделив их на общий расход газа, получим его более низкое значение теплотворной способности [49].

Qн = 47 667,75 кДж/кг.

Затем находим продукты сгорания газа, исходя из стехиометрии каждой реакции [100], и эти реакции представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Химические реакции горения природного газа

Химическая реакция	Требуемое количество молей O_2	Количество образ. молей CO_2	Количество образ. молей H_2O	Количество образ. молей SO_2
$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O$	2	1	2	0
$C_2H_6+3{,}5O_2 \rightarrow 2CO_2+3H_2O$	3,5	2	3	0
$C_2H_4+3O_2 \rightarrow 2CO_2+2H_2O$	3	2	2	0
$C_3H_8+5O_2 \rightarrow 3CO_2+4H_2O$	5	3	4	0
$C_3H_6+4{,}5O_2 \rightarrow 3CO_2+3H_2O$	4,5	3	3	0
$C_4H_{10}+6{,}5O_2 \rightarrow 4CO_2+5H_2O$	6,5	4	5	0
$C_4H_8+6O_2 \rightarrow 4CO_2+4H_2O$	6	4	4	0
$C_5H_{12}+8O_2 \rightarrow 5CO_2+6H_2O$	8	5	6	0
N_2 (Не горит)	-	-	-	-
$CO+0{,}5O_2 \rightarrow CO_2$	0,5	1	0	0
CO_2 (не горит)	-	-	-	-
$H_2S+1{,}5O_2 \rightarrow SO_2+H_2O$	1,5	0	1	1

С помощью данных таблицы 3.3 рассчитаем необходимые теоретические моли O_2: $nO_{2(необх.)}$ = 287,50 моль/ч.

Далее необходимо выполнить расчет количества воздуха, и тогда получаем необходимый расход кислорода, из воздуха 21%=O_2 для полного сгорания топлива: $nO_{2(треб.)}$ = 287,50 моль/ч; воздух(треб.) = 18 008,52 кг/ч.

В итоге, вычисляем поток сгоревшего газа и его связь с потоком отходящих дымовых газов. Принимаем во внимание, что поток сгоревшего газа равен сумме всего объема природного газа и воздуха для обеспечения устойчивого горения. Поток сгоревшего газа равен 18 824,99 кг/ч. Далее рассчитываем объем потока сгоревшего газа, и делим на поток дымовых газов:

18 824,99 кг/ч / 816,50 кг/ч = 23,05 кг газа.

Состав сгоревшего газа, вычисляем используя реакции горения в таблице 3.3. Как известно из справочных данных [43], на каждый моль CH_4 образуется 2 моля CO_2.

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

Общий молярный поток CO_2 на выходе составляет:

Общий CO_2 = общий образованный CO_2 + исходный CO_2

Общий CO_2 = 137,53 моль/ч.

Такой метод расчета универсален, и подходит для других составляющих газа, и газообразных продуктов выходящих из дымохода, как показано в таблице 3.4. Измерение количества отходящих загрязняющих веществ на печи в промышленных условиях осуществлялось при помощи газоанализаторов марки MRU Delta 65-3.

Таблица 3.4 – Общий расход газов на выходе отражательной печи в сухом и влажном состоянии

Компоненты сгоревшего газа	Единица измерения, (моль/ч)	С содержанием влаги (в влажном виде), %	Без содержания влаги (в сухом виде), %
CO_2	137,53	9,29	10,91
H_2O	219,98	14,85	0,00
SO_2	0,0048	0,0003	0,0004
O_2	40,51	2,74	3,21
N_2	1082,96	73,12	85,88
Сумма	1480,99	100%	100%

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 K, которое можно найти в литературе. Суммарная теплотворная способность каждого газа на выходе при 176°C – это потери тепла в дымоходе. В таблице 3.5 приведены результаты расчета тепловых потерь отходящих газов на выходе из ОП в систему газоходов.

Таблица 3.5 – Тепловые потери отходящих газов на выходе отражательной печи

Компоненты сгоревшего газа	Состав, (моль/ч)	Молярная масса, (г/моль)	Вес, (кг/ч)	Общий вес топлива, (кг)	Энтальпия при 448 K	Теплотворная способность топлива, кДж/кг
CO_2	137,53	44	2744,83	3,36	63,72	214,24
H_2O	219,98	18	1796,06	2,20	131,25	288,71
SO_2	0,0048	64	0,14	0,0002	46,95	0,01
O_2	40,51	32	588,00	0,72	63,54	45,76
N_2	1082,96	28	13754,22	16,85	74,56	1256,04
Сумма	1480,98	–	–	–	Qs =	1804,76

Обычно значения КПД варьируются от 70% до 95% и, следовательно, это определяет эффективность работы печи. Тепловые потери в боковой футеровке и своде печи достигают 12,5-14,5%, где кроме этих потерь происходят также неконтролируемые потери тепла в образующихся газах. Допустимые значение тепловых потерь в проекте 2,5%. Рассчитаем радиационные потери ($Q_{\text{р}}$) на основе более низкой теплотворной способности по формуле 3.1:

$$Q_p = \text{Q}_н \cdot \ (предполагаемый\ процент\ потерь) \tag{3.1}$$

$$Q_p = 47\ 667{,}75\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 2{,}5\% = 1\ 191{,}69\ кДж/кг$$

Наконец, вычисляем явное тепло воздуха и продуктов сгорания по формуле 3.2 и 3.3:

$$Q_я(воздуха) = \frac{кг_{воздуха}}{кг_{пс}} \cdot Ср_{воздуха} \cdot (T_t - T_d) \tag{3.2}$$

$$Q_я(воздуха) = 9{,}97\ кг \cdot 0{,}24 \cdot (20 - 15) = 11{,}96\ кДж/кг$$

$$Q_я(продукты\ сгорания) = Ср_{топлива} \cdot \left(T_f - T_d\right) \tag{3.3}$$

$$Q_я(продукты\ сгорания) = 0{,}53 \cdot (25 - 15) = \ 12{,}31\ кДж/кг$$

Чистый тепловой КПД (e) можно определить по формуле 3.4:

$$e = \frac{(\text{Q}_н + Q_я(воздуха) \cdot Q_я) - Q_s - Q_p}{(\text{Q}_н + Q_я(воздуха) \cdot Q_я)} \quad ; \tag{3.4}$$

$$e = \frac{(47\ 667{,}75 + 11{,}96 \cdot 12{,}31) - 1804{,}76 - 1\ 191{,}69}{(47\ 667{,}75 + 11{,}96 \cdot 12{,}31)} = 93{,}73\%.$$

Итоговая расчетная цифровая модель показана на рисунке 3.2, и была разработана в программе AVEVA PRO/II. Для этой схемы использовалась модель реактора замкнутого типа, в которой расход воздуха рассчитывался по процентному содержанию кислорода в продуктах сгорания газов. Установлено, что не все переменные оказывают существенное влияние на рассчитываемый тепловой КПД печи, но некоторыми, в итоге, можно пренебречь [102].

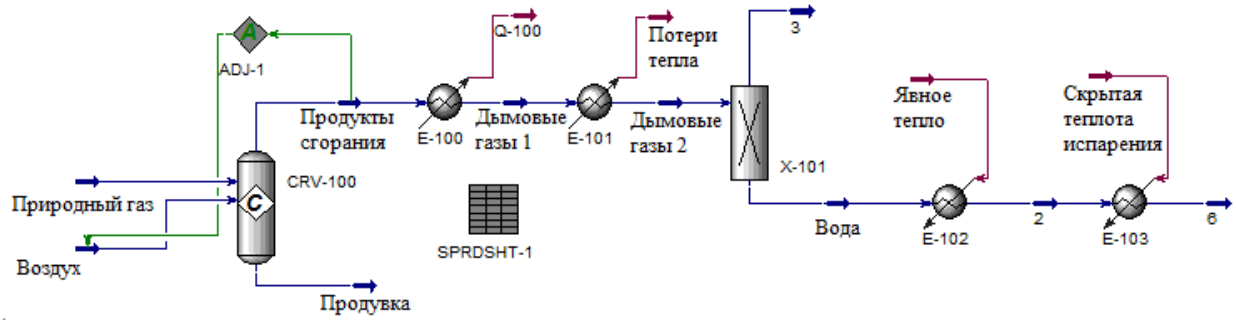


Рисунок 3.2 – Схема конструкции процесса горения в отражательных печах в программе AVEVA PRO/II [59]

Схема (рисунок 3.2) позволяет оценить состав сжигаемого газа в сухом виде. Данные и результаты моделирования показаны на таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Данные и результаты моделирования

Компоненты природного газа	Состав природного газа, (моль)	Молекулярный вес	Общий вес, (кг/ч)	Теплотворная способность, (кДж/кг)	Общая теплотворная способность, (кДж/ч)
Метан	90,08	16	653,173	50009	32664529,19
Этан	2,14	30	0,90	47 496,92	108881,76
Этилен	2,28	28	13,60	47 194,54	646327,21
Пропан	0,29	44	12,70	46 357,18	599398,33
Пропилен	2,95	42	19,95	45 798,94	925199,57
Бутан	0,11	58	19,05	45 752,42	872510,08
Бутилен	1,06	56	26,30	45 170,92	1203671,02
Пентан	0,04	72	25,40	45 357	1147394,34
Азот	0,43	28	14,36	-	651771,30
Монооксид углерода	0,74	28	18,16	10 106,47	-
Углекислый газ	0,17	44	9,39	-	94984,56
Сероводород	0,0048	34	3,39	15 235,3	-
Сумма	100	–	816,50	–	38914667,36
Qн	–	–	–	–	47 667, 75

Видно, что не все переменные оказывают существенное влияние на рассчитываемый тепловой КПД печи, но есть переменные, которые следует учитывать при расчете теплового КПД печи.

а) Изменение температуры газов на выходе из дымохода

На рисунке 3.3 видно, как при небольшом изменении температуры газов на выходе из дымохода тепловой КПД меняется примерно на 4%.

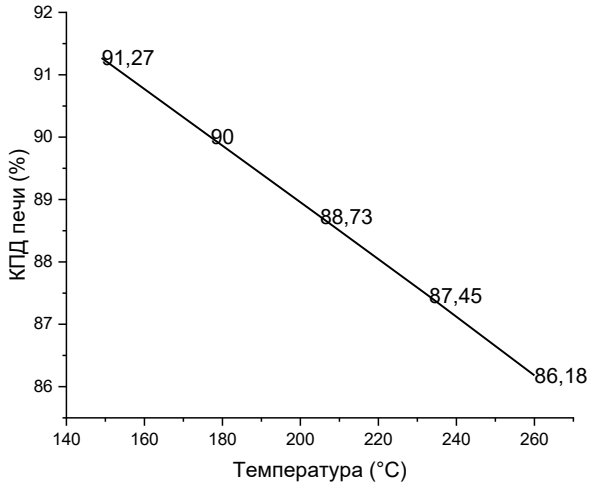


Рисунок 3.3 – Изменение теплового КПД в зависимости от температуры дымовых газов

б) Изменение температуры воздуха для обеспечения сгорания топлива

Результаты, приведенные на рисунке 3.4, показывают, что при изменении температуры воздуха для устойчивого и полного сгорания, тепловой КПД печи изменяется примерно на 0,02%.

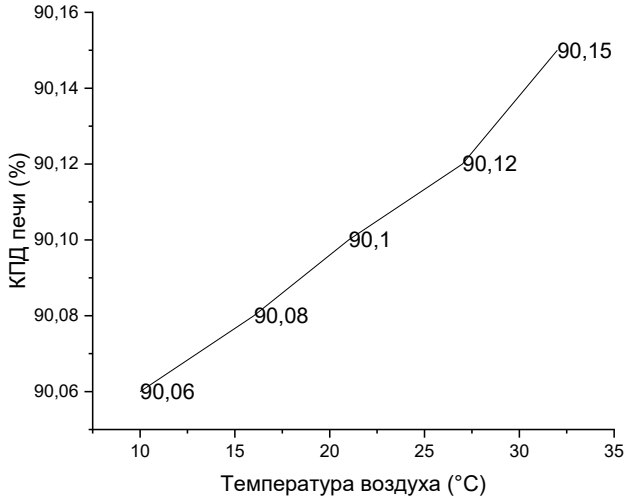


Рисунок 3.4 – Изменение КПД в зависимости от температуры воздуха для горения

в) Изменение теплового КПД в зависимости от суммарных тепловых потерь.

На рисунке 3.5 видно, как при изменении тепловых потерь КПД повышается примерно на 0,5%.

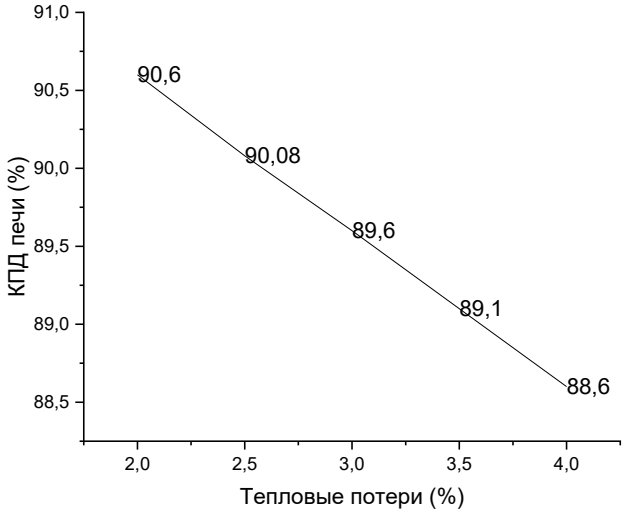


Рисунок 3.5 – Изменение КПД в зависимости от тепловых потерь

Проведенный аналитический расчет влияния условий подачи природного газа различного состава через горелки среднего давления марок ГГСБ-1,4 и ГГСБ-2,2 в отражательную печь по промышленным данным при получении чернового никеля позволил определить условия управления тепловым балансом при контроле состава отходящих газов.

Установлено, что переменная, которая имеет наибольшее влияние на расчет на тепловой КПД - это низшая теплотворная способность, поскольку ее значение зависит именно от состава природного газа.

Отражательные печи потребляют от 75 до 80% всей энергии, получаемой из топлива. Таким образом, для повышения энергоэффективности можно снизить их потребление энергии за счет сокращения расхода природного газа и обеспечения его полного сгорания для рационального использования выделяемого тепла и стабилизации теплового состояния отражательной печи.

3.2 Моделирование влияния состава природного газа на тепловой КПД отражательной печи

Для адаптации общей математической модели к реальным производственным условиям проведена разработка комбинированной модели горения CFD с соответствующей теплопередачей при помощи программы ANSYS 2019R3, с учетом влияния состава природного газа на термодинамику реакционных процессов и эффективность работы печи. Для расчетов принята отражательная печь с рабочими размерами внутренней части 4,5 х 3,5 х 2 метра (LxBxh), что соответствует типовым размерам отражательной печи МЕРЦ для рафинирования

никелевых сплавов (рисунок 3.6) (прототип печи Новгородского металлургического завода, ЗАО НМЗ). Емкость печи составляет 20 тонн.

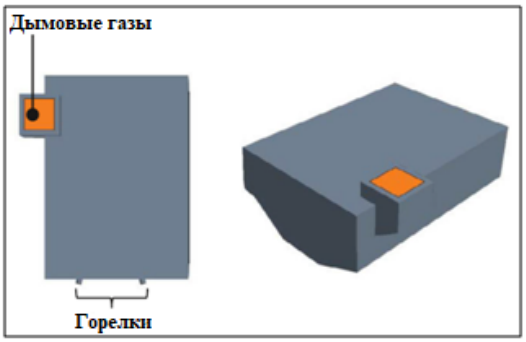


Рисунок 3.6 – Расчетная первичная модель ОП для производства никелевых сплавов

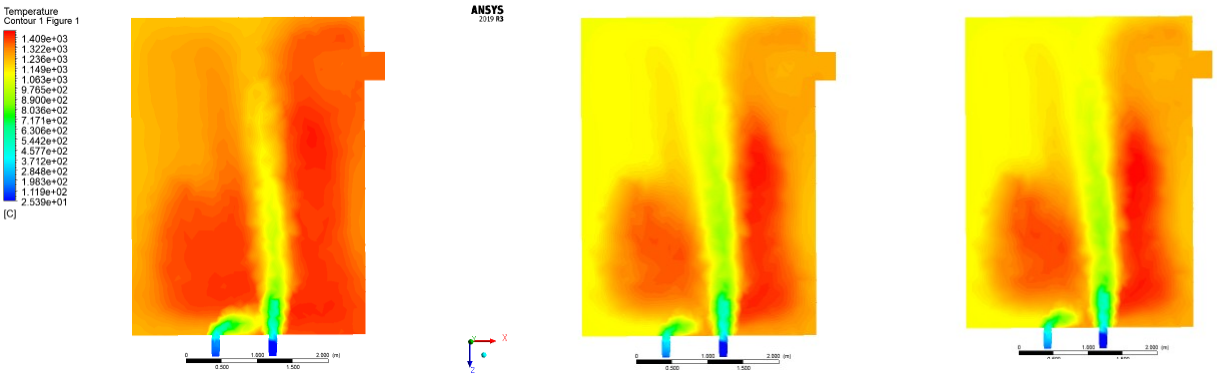
Печь имеет 2 горелки, работающих на природном газе среднего давления, с выхлопным каналом, расположенным на конце, примыкающем к горелкам тракте печи. Как правило, проблемы работы этой печи заключаются в том, что импульс пламени направлен в выходной канал, поэтому циркуляция газа особенно в районе выхода газа незначительна. Печь сконструирована с учетом изменяющегося давления дымовых газов, поверхности расплава и настыли на огнеупорной стенке [60]. Газовая камера сгорания соответствует месту, где происходит горение и рассеиваются горячие газы. Граница раздела между дымовыми газами и стенками печи обеспечивает равномерную передачу тепла. Модель печи выполняется с учетом использования природного газа в качестве топлива трех различных составов, представленных в таблице 3.7, и с расходом воздуха, эквивалентным 0,024 кг / с. Примерная мощность источника тепла равна 1350 кВт.

Таблица 3.7 – Различные составы природного газа для подачи в печь

Компоненты природного газа	Образец 1 Gazprom, Нижний Новгород № В-06-20-ГП, Россия (%)	Образец 2 Natural Gas Fenosa, Испания (%)	Образец 3 c. Natural Gas, Боливия (%)
Метан (CH_4)	95,89	89,67	85
Этан (C_2H_6)	2,48	2,14	6,12
Пропан (C_3H_8)	0,057	0,7	3,75
Бутан (C_4H_{10})	0,167	0,5	1,06
Пентан (C_5H_{12})	0,0242	0,05	0,66
Гексан (C_6H_{14}) +	0,0149	0,02	0,1
Углекислый газ (CO_2)	0,248	1,5	1,4
Азот (N_2)	0,597	0,4	0,78
Водород (H_2)	0,0015	3,5	0,5
Кислород (O_2)	0,0050	0,0034	-
Гелий + другие	0,52	0,8	-
ИТОГО	100,004	99,283	99,37

Химический состав природного газа делает его самым экологически чистым из ископаемых видов топлива, по этой причине его использование увеличивается во всем мире. Более высокое соотношение водород/углерод в его составе по сравнению с другими ископаемыми видами топлива приводит к тому, что при сгорании выделяется меньше CO_2 на единицу произведенной энергии.

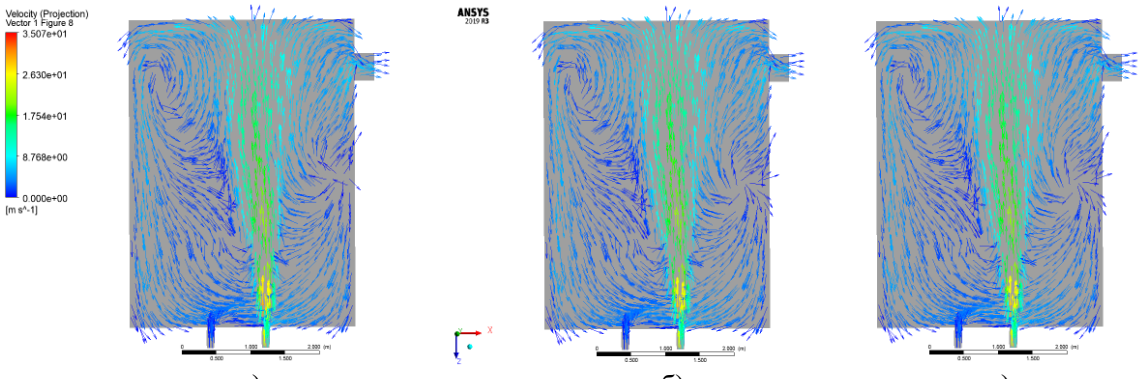
На рисунке 3.7 показано изменение температур, которые влияют на передачу тепла к расплаву для различных составов природного газа.



а) б) в)

Рисунок 3.7 – Температурный фон и теплопередача от пламени горелки к расплаву: а) количество CH_4 - 95,89%, б) количество CH_4 - 89,67% и в) количество CH_4 - 85%

На рисунке 3.8 показано изменение температурного поля, которое определяет передачу тепла к расплаву штейна при различных составах природного газа в горелках. Видно, что чем больше содержание метана в природном газе, тем выше его теплотворная способность, следовательно, эффективней нагрев расплава.



а) б) в)

Рисунок 3.8 – Профили скоростей потока для различных составов природного газа: а) количество CH_4 - 95,89%, б) количество CH_4 - 89,67% и в) количество CH_4 - 85%

На рисунке 3.8 показан профиль изменения скорости потока для различных составов природного газа, который отображает минимальный уровень рециркуляции газов,

образующихся при сгорании в атмосфере отражательной печи для никелевых сплавов [96]. Видно, что на модели один из потоков пламени направлен к правой стороне печи, и далее он взаимодействует с остальными газовыми потоками. Это может объяснено локальной турбулентностью потока и участками завихрения в месте перехода отходящих газов из под свода печи в систему газоходов [28].

При сжигании природного газа, состоящего в основном из метана (CH_4), выделяется на 25% меньше CO_2, чем при сжигании нефтепродуктов, и на 40% меньше CO_2, чем при сжигании угля на единицу произведенной энергии. Поскольку это газ, его смешивание с воздухом и последующее сгорание легче, чем с другими ископаемыми видами топлива, а отсутствие частиц и агрессивных соединений серы способствует рекуперации остаточного тепла и, следовательно, эффективности его использования. Кроме того, запасы природного газа велики, а его транспортировка и распределение по подземным трубопроводам сводят к минимуму его воздействие на ландшафт. Эквадор имеет значительные запасы природного газа, поэтому организация металлургического производства в газовых печах экономически целесообразна. Кроме этого, в стране существуют значительные запасы латеритных никелевых руд [95].

3.3 Создание программы для ЭВМ «Программа контроля теплового баланса отражательной печи с учетом условий сжигания и состава природного газа»

Представлена экспериментальная модель, разработанная для изучения влияния состава и условий подачи природного газа через газовые горелки на тепловой КПД отражательной печи для никелевых сплавов [13].

Решение задач рационального энергоснабжения металлургических агрегатов связано с проблемами некоторых ограничений при использовании ископаемого топлива и постоянного изменения цен на газ и нефтепродукты. Использование природного газа в качестве чистого топлива по конкурентоспособным ценам выгодно в промышленном, и коммерческом масштабе, особенно в производстве чернового никеля и меди при температурных режимах свыше 1500^{o}C [36], в соответствии с концепцией снижения углеродного следа пирометаллургических производств.

Программа дает возможность расчета теплового КПД отражательной печи с помощью алгоритма на основе полученных данных анализа состава дымовых газов и самого природного газа при его сжигании [33].

Существует несколько способов расчета теплового КПД печи на основе первого закона термодинамики или анализа дымовых газов [13]. В нашем случае основываемся на функциональной зависимости температуры дымовых газов и его теплотворной способности. Этот метод учитывает анализ состава дымовых газов и температуры дымохода для расчета

теплового КПД. В текущих расчетах используются стандартные графики давления избыточного воздуха в объеме печи и энтальпий компонентов дымовых газов для упрощения процедуры регистрации данных.

Описанный способ предназначен только для отражательных печей, работающих с горелками среднего давления на природном газе. Для описания процедуры, рассчитывается, и учитываются следующие параметры:

- Низкая теплотворная способность газа ($Q_н$) или теплота сгорания топлива,
- Температура воздуха для горения и расход дымовых газов,
- Состав дымовых газов (при изменении влажности),
- Расчетный тепловой КПД печи.

При создании экспериментальной модели для изучения влияния химического состава природного газа на тепловой КПД отражательной печи, возникает необходимость в разработке программного обеспечения, способного обрабатывать данные, полученные в производственных условиях, и ввод исходных данных о составе природного газа и его теплотворной способности в матрицу программы, которая после функциональных преобразований указывает текущее значение теплового КПД печи для выполнения управляющих воздействий через систему АСУ ТП.

Программное обеспечение разработано в среде guide/matlab на интерактивной платформе, при которой можно программировать процесс в визуальной среде, и регистрировать результаты плавки при изменении КПД.

Разработанная программа работает следующим образом (Рисунок 3.9):

1. Ввод данных химического состава природного газа, с которым будет работать отражательная печь во время всего цикла плавки. Сумма химических компонентов должна быть равна 100. В таблице 3.7 показаны примеры 3-х различных составов природного газа.
2. Ввод значений температуры печных отработанных газов на выходе из печи в градусах Цельсия. Температура может варьироваться от 150˚C до 200˚C.
3. Ввод температуры воздуха для устойчивого горения в градусах Цельсия. Температура может изменяться от 20˚C до 25˚C.
4. Ввод значений температуры газа при сгорании в градусах Цельсия. Температура может варьироваться от 20˚C до 25˚C.
5. Ввод температуры окружающей среды в градусах Цельсия. Температура может изменяться от 10˚C до 20˚C.
6. Ввод общих тепловых потерь, которые могут составлять от 2 до 5%.
7. Выбор графической компоненты, необходимой для оптимизации процесса. Разработанная программа имеет три варианта построения графической зависимости:

- Изменение КПД в зависимости от температуры дымовых газов на выходе печи,
- Изменение КПД в зависимости от температуры воздуха для горения,
- Изменение КПД в зависимости от общих тепловых потерь.

После выбора графической компоненты программы выполняются автоматические расчеты в среде Guide/Matlab

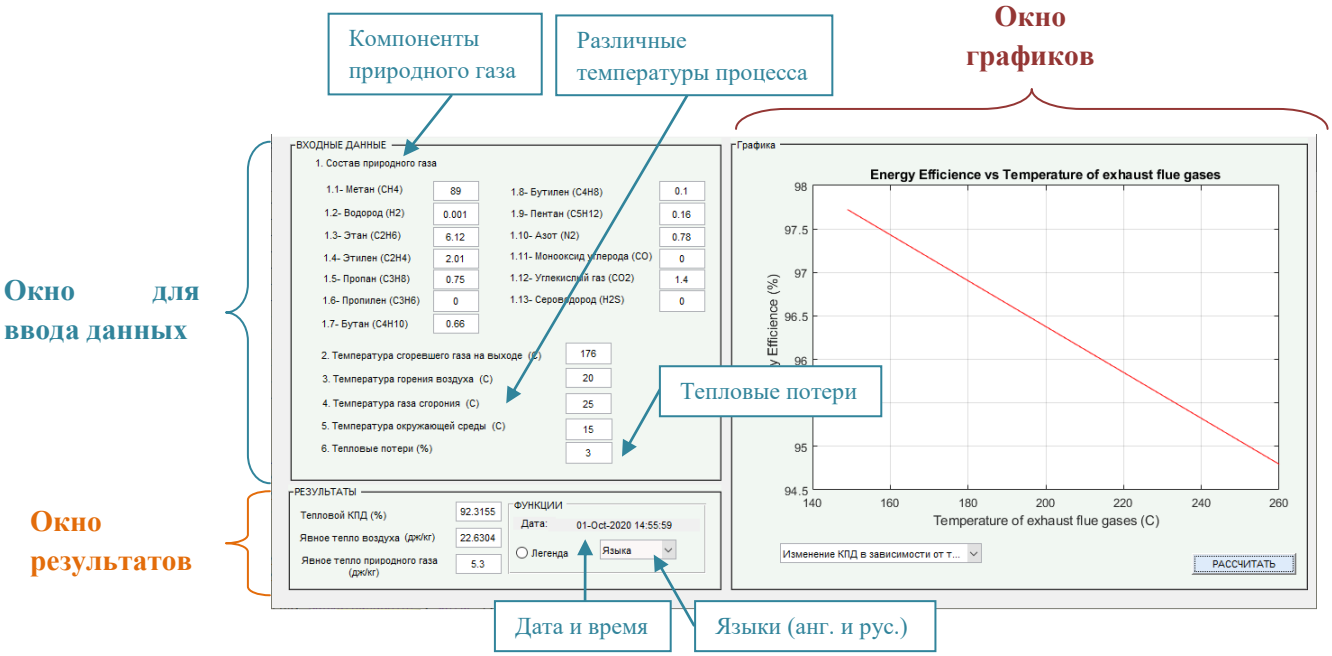


Рисунок 3.9 – Программа обработки данных в Guide/Matlab для экспериментальной модели

Использование этого вычислительного комплекса и инструментов для обработки данных, при соответствии с экспериментальной моделью, позволяет с достаточной скоростью воспроизводить результаты для последующей передачи данных для управляющего воздействия на системы регулирования печи.

В результате создана экспериментальная модель контроля теплового баланса отражательной печи с учетом состава природного газа и его теплотворной способности.

Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

1. Расчет реального тепла воздуха,
2. Расчет текущего значения тепла природного газа,
3. Расчет тепловой КПД отражательных печей.

Программа позволяет рассчитывать тепловой КПД при изменении состава природного газа и его теплотворной способности.

3.4 Выводы по третьей главе

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных при проведении математического моделирования по определению влияние химического состава и свойств природного газа в тепловой КПД отражательной печи на основе среднестатистических производственных данных.

1. Установлено, что переменной, которая имеет наибольшее влияние на тепловой КПД является значение теплотворной способности, так как оно зависит от состава природного газа. Предложенная методика расчета теплового КПД с использованием компьютерной программы эффективна в случае, если оператор на месте хочет оценить эффективность работы печи.

2. Установлено влияние состава природного газа на величину теплового КПД и температуры процесса с учетом показателя его теплотворной способности на основе разработанного программного комплекса (№2020665700).

3. По результатам проверки разработанной комбинированной модели CFD печи при различном расположении газовых горелок для улучшения рециркуляции отходящих газов доказано, что чем больше содержание метана в природном газе, тем выше его теплотворная способность для обеспечения равномерного нагрева расплава с учетом конфигурации элементов и конструкции печи, ее футеровки и значений тепловых потерь на каждом участке.

В результате анализа обработанных данных сформулировано следующее научное положение:

Заданный режим нагрева расплава в отражательной печи при снижении количества потерь тепла на 10-12% во время рафинирования никеля обеспечивается регулированием давления в горелках газовых печей с учетом состава природного газа и его теплотворной способности.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ГАЗОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ОГНЕВОМ РАФИНИРОВАНИИ НИКЕЛЯ

4.1 Создание системы контроля и алгоритма управления горелками отражательных печей

Для устойчивой работы отражательной печи с учетом регулирования газовыми горелками в зависимости от состава природного газа с учетом изменяющегося теплового режима печи и степени нагрева расплава до необходимого интервала температур необходим ввод дополнительных параметров. На рисунке 4.1 указаны участки цифровой системы автоматического контроля и регулирования, использование которых обеспечивает более высокие технико-экономические показатели процесса плавки, и предотвращает возникновение в цехе аварийных ситуаций за счет прогноза технологической ситуации с использованием информации обновленной BigData [2].

Контрольные участки цифровых измерений и оперативного управления процессом огневого рафинирования никеля состоят из следующих подсистем [23]:

1. Системы цифрового автоматического регулирования в участке газохода

– регулирование соотношения расходов газ–воздух с управляющим воздействием на общий расход воздуха;

– регулирование температуры в реакционном пространстве печи с управляющим воздействием на общий расход газа;

– регулирование давления разрежения в газоходом тракте перед котлом–утилизатором с управляющим воздействием на дымовой шибер;

– регулирование состава природного газа.

2. Системы общего цифрового автоматического контроля печи (системный блок цифровой трансформации с блоком BigData), с выводом на панель управления процессом данных [73]:

– контроль и регистрация температуры, расхода воздуха для сжигания газа;

– контроль и регистрация расхода и давления природного газа перед горелкой;

– избирательный контроль и регистрация температуры в различных точках подины печи;

– контроль и регистрация содержания CO, CO_2 и O_2 в отходящих газах;

– контроль и регистрация температуры воды, охлаждающей дымовой шибер;

– контроль и регистрация температуры и давления разрежения в газоходом тракте после котла–утилизатора.

– система аварийной безопасности и предупреждения в случае превышения значений регулируемых параметров.

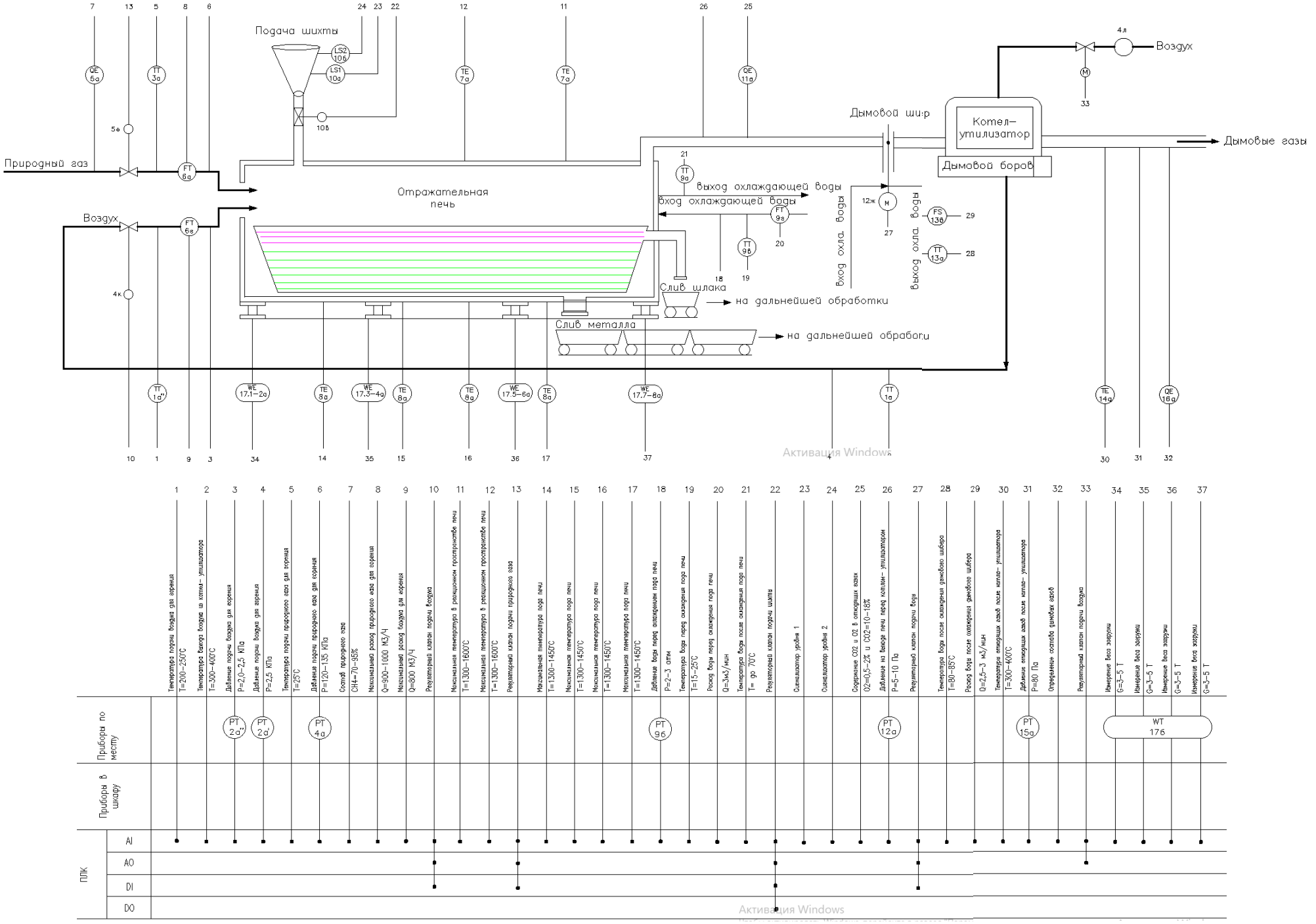


Рисунок 4.1 – Схема цифровой автоматизации отражательной печи для рафинирования никеля

Описание системы автоматического контроля и регулирования ОП [54]

- Система автоматического контроля температуры воздуха

В комплект приборов входит термопреобразователь сопротивления (поз. 1а).

- Система автоматического контроля давления воздуха

Отбор давления из воздухопровода осуществляется отборным устройством (поз. 2а).

- Система автоматического контроля температура природного газа

В комплект приборов входит термопреобразователь сопротивления (поз. 3а).

- Система автоматического контроля давления природного газа построена аналогично предыдущей системе и включает отборное устройство (поз. 4а).

- Система автоматического контроля состава природного газа построена аналогично предыдущей системе и включает отборное устройство (поз. 5а).

- Система автоматического регулирования соотношения расходов газ–воздух имеет в своем составе приборы для контроля расходов газа и воздуха.

Расход газа и воздуха измеряют расходомерами, включающими сужающие устройства (поз. 6а, 6г).

- Система автоматического регулирования температуры в реакционном пространстве печи.

В данном проекте принято автоматическое регулирование подачи топлива по значению температур в начале и конце печи. Такая двух импульсная система принципиально более правильна, чем одноимпульсная – по температуре в ядре горения факела, что связано с весьма значительными размерами печи и наличием в ней большого количества загрузочных окон, ограничивающих возможность получить единый представительный отбор импульса по температуре в печи (поз. 7а) [15].

- Система автоматического контроля температуры пода печи, когда измерение температуры осуществляется с помощью термопар, вмонтированных в кладку пода печи в нескольких точках (поз. 8а).

- Система автоматического контроля охлаждения пода печи, и измерение температуры воды осуществляется с помощью термопар на выходе, вмонтированных в кладку пода печи (поз. 9а). Измерение температуры воды осуществляется с помощью термопар на входе, давление (поз. 9в) и расход газа (поз. 9г).

- Система автоматического контроля подачи шихты построена аналогично предыдущей системе и включает отборное устройство (поз. 10а).

- Система автоматического контроля содержания CO_2 и O_2 в отходящих газах

Включает в себя магнитный газоанализатор на CO_2 и O_2 (поз. 11а).

- Система автоматического регулирования разрежения на выходе печи, в котором регистрация импульса производится в начале газоперепускного борова (поз. 12а).

- Система автоматического контроля температуры воды после охлаждения дымового шибера, где комплект приборов включает термопреобразователь сопротивления (поз. 13а).
- Система автоматического контроля температуры отходящих газов, при которой измерение осуществляется с помощью термопары (поз. 14а).
- Система автоматического контроля разрежения после котла–утилизатора включает отборное устройство (поз. 15а).
- Система автоматического контроля состава дымовых газов построена аналогично предыдущей системе и включает отборное устройство (поз. 16а).
- Система автоматического контроля веса загрузки построена аналогично предыдущей системе и включает отборное устройство (поз. 17а).

Регенеративные горелки имеют на поверхности защитный керамический слой, через который продукты сгорания пропускаются перед отправкой в дымоход, в результате чего тепловая энергия, переносимая газами, через некоторое время накапливается в керамическом слое. Система автоматически переключается, проходя через слой холодного воздуха, который компенсирует энергию, накопленную в слое, и возвращает ее обратно в систему для рекуперации тепла от 70 до 85%, что позволяет значительно экономить топливо в зависимости от рабочей температуры процесса. Эти горелки используются в качестве дополнительных систем сжигания в отражательных печах для плавки никеля [15].

Кроме того, современные типы регенеративных горелок с новыми характеристиками, такими как работа в режиме беспламенного горения при разряжении, для улучшения однородности температуры и теплопередачи в дополнение к сокращению выбросов NOx, которые имеют лучшую эффективность рекуперации тепла, а также изготовлены из более компактных и легких материалов, что позволяет масштабировать технологию для использования в печах малой мощности [20].

Кроме того, были разработаны «однопламенные» регенеративные горелки [1], которые не требуют работы в парах, но одна горелка способна выполнять как задачи сжигания, так и рекуперации тепла, и эта схема, которую использовали в данном исследовании. Для установки горелки подобного типа необходимо проанализировать текущее технологическое и техническое состояние печи (целостность футеровки, изоляцию, наличие утечек и подсосов), чтобы воспользоваться ее преимуществами и характеристиками для оценки энергоэффективности. Регенеративные горелки имеют экономические преимущества в отношении рекуперации тепла и, следовательно, работают с более высокой энергоэффективностью, поскольку они наиболее подходят для процессов с очень высокими температурами [4].

Разработка системы управления газовой горелкой

В этой системе использовали программируемый логический контроллер (ПЛК) Schneider Electric Modicon M580 ePAC, который будет выступать центральной частью управления системой подачи газа горелки, как видно на рисунке 4.2.

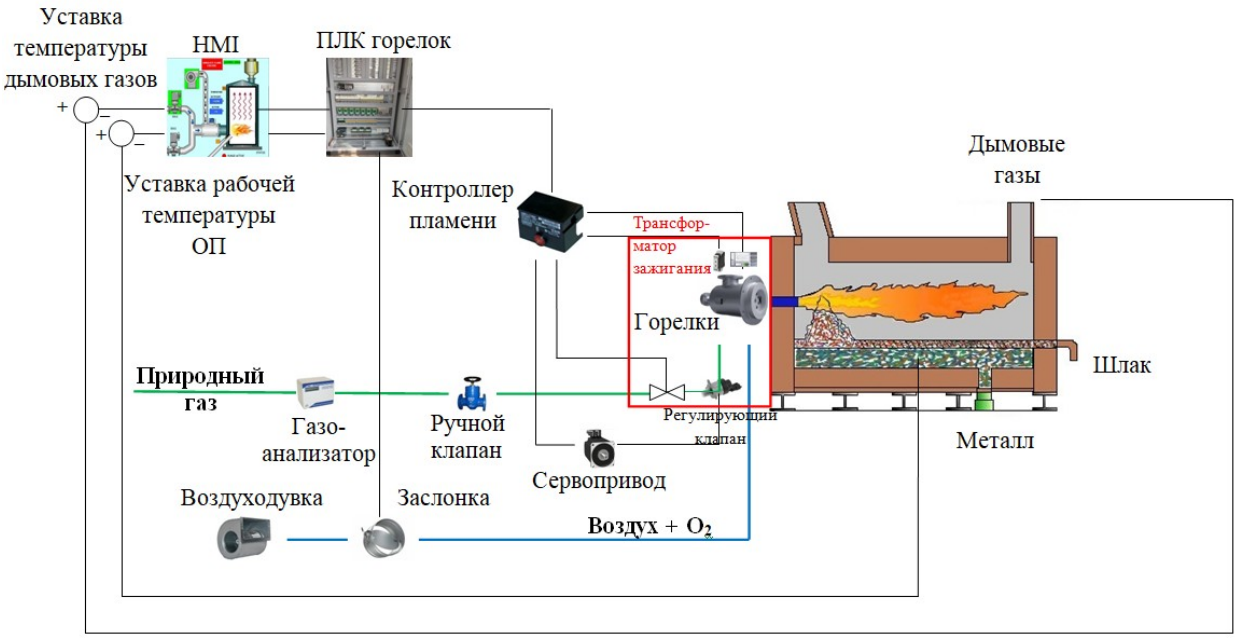


Рисунок 4.2 – Блок-схема управления газовой горелкой печи ОП

Отражательная печь имеет несколько датчиков температуры, которые выдают сигналы о рабочей температуре (рисунок 4.3) [22].

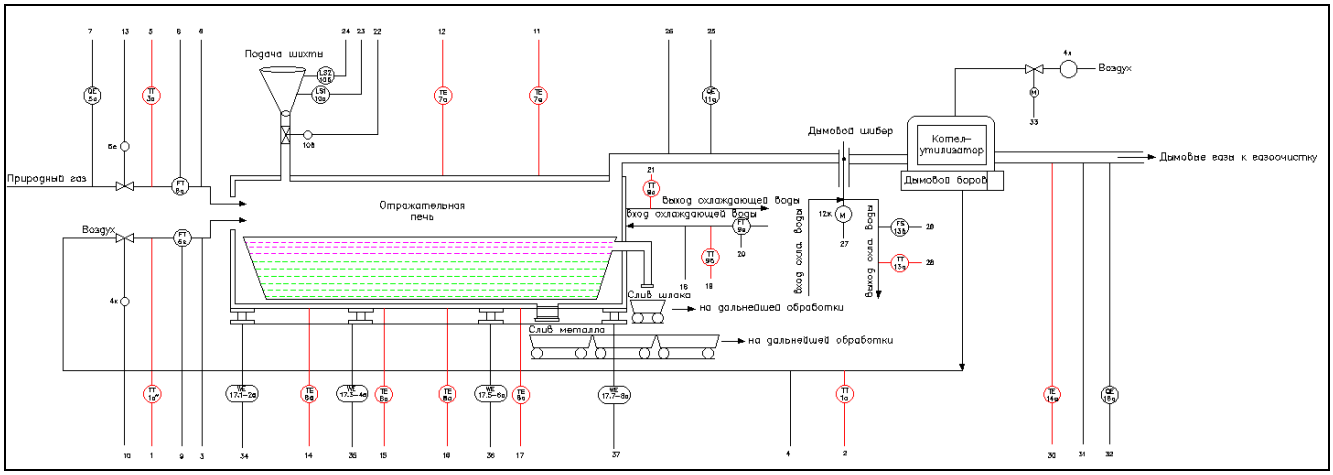


Рисунок 4.3 – Схема приборов для контроля температуры

Температура регулируется клапаном распределения природного газа для всех горелок и отдельными клапанами каждой горелки. Регулировка клапанов позволяет контролировать поток пламени и длину факела, и, следовательно, регулировать температуру расплава [6]. Давление природного газа для входа в систему измеряется в совокупности с работой нагнетательных

насосов, которые регистрируют и контролируют давление на входе в горелки для рационального сгорания топлива. Управляющее воздействие в предлагаемом варианте будет осуществляться открытием и закрытием воздушных заслонок для обеспечения устойчивого горения в объеме печи.

На рисунке 4.4 подробно показана схема регулирования рабочей температуры.

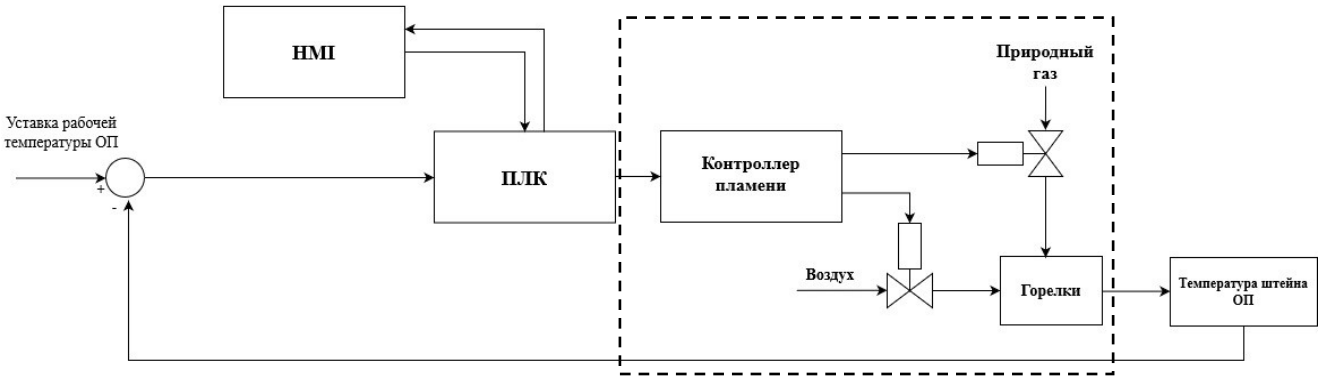


Рисунок 4.4 – Контроль рабочей температуры процесса

Контроль запуска горелки включает в себя управление каждой горелкой с помощью контроллера пламени, который получает сигнал от ПЛК, включающий и выключающий горелку в зависимости от температуры, которая зарегистрирована между установкой предела по рабочей температуре ОП, и фактической рабочей температурой [68].

а) Управление горелкой

Управление каждой горелкой осуществляется следующим образом:

- ПЛК отправляет и передает контроллеру сигнал для запуска последовательности;

- контроллер с помощью внутреннего таймера ожидает примерно 15 секунд и отправляет два сигнала: первый для открытия соленоида природного газа, а второй активирует высоковольтный трансформатор, который через электрод зажигает искру, и контакт с природным газом, в тот момент, когда создается «пилотное пламя»;

- затем при появлении или отсутствии пламени идет проверка с помощью УФ-датчика, который при обнаружении состояния подает сигнал контроллеру для последующего открытия соленоида природного газа и достижения конечного рабочего пламени, который нагревает печь.

б) Регулирование природного газа - воздуха для горения

Посредством управления от ПЛК позиционный двигатель получает команду для регулирования подачи воздуха для горения, а еще другой для регулирования клапана природного газа с учетом его состава. Все это необходимо для обеспечения правильного содержания и соотношения объема и массы воздуха и природного газа [68].

Схема управления запуском каждой горелки представлена на рисунке 4.5.

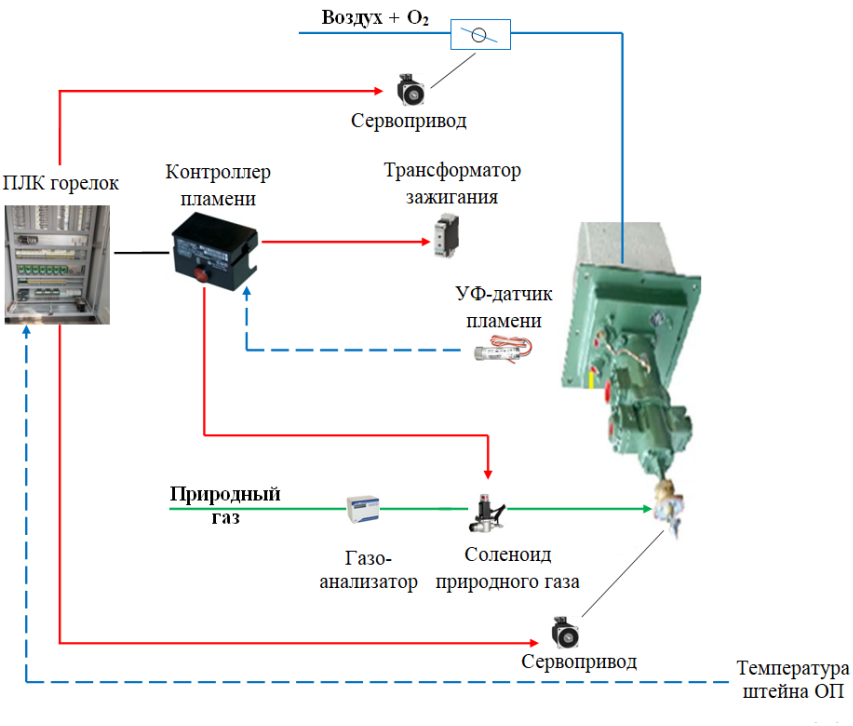


Рисунок 4.5 – Схема контроля запуска каждой газовой горелки

Алгоритм работы горелки

Химический процесс горения происходит благодаря окислению компонентов топлива, когда они соединяются с кислородом воздуха переходя в оксидные формы. Если в топливе есть сера, при его сгорании образуются оксиды серы, которые производят коррозионные продукты. Если в топливе есть азот, то он в сочетании с кислородом образует оксиды азота $(NO)_x$.

Количество энергии, теряемой через дымоход, зависит от количества избыточного воздуха и температуры газов на выходе. Для идеального сгорания воздуха соотношение этих показателей должно быть достаточно, но не чрезмерно. Согласно ранее полученным математическим моделям содержание воздуха по отношению к природному газу должно составлять от 64% до 240%. Воздух должен образовывать смесь в пределах воспламеняемости с температурой 530°C. Идеальное сгорание должно соответствовать правилу трех Т: короткий период времени (t_1), получение высокой температуры (t_2) и образование турбулентного пламени (t_3). Турбулентность очень важна, поскольку если топливо и воздух хорошо перемешаны, то все топливо сгорает, а температура пламени будет достаточно высокой, и время сгорания топлива будет коротким.

Теоретическое количество воздуха, необходимого для полного сжигания природного газа, можно рассчитать по формуле 4.1:

$$11{,}3 \cdot \mathrm{C} + 34{,}34 \cdot \left(\mathrm{H} - \frac{\mathrm{O}}{8}\right) + 4{,}29 \cdot \mathrm{S} \qquad (4.1)$$

где C, H и S – углерод, водород и сера в природном газе;

$\frac{O}{8}$ – поправка на водород, который присутствует в виде воды в природном газе.

Избыточный воздух будет выходить из дымовых газов, при этом, процентное содержание кислорода (% O_2) в дымовых газах можно использовать для определения общего содержания избыточного воздуха.

Тепловые потери, связанные с дымовыми отходящими газами, зависят от температуры дымовых газов, температуры воздуха для горения, количества избыточного воздуха и состава природного газа. Необходимое количество избыточного воздуха зависит от типа топлива, конструкции горелки, конструкции печи, нагрузки в процентах от максимальной нагрузки, скорости подачи воздуха и условий окружающей среды. Чтобы определить эти значения нужно провести расчеты по созданной математической модели печи ОП.

Избыток кислорода и воздуха для природного газа при максимальной нагрузке составляет следующие значения:

- среднее содержание кислорода в дымовых газах в пределах от 0,6 до 3%;

- минимальное содержание избыточного воздуха должно быть от 3 до 15%.

Общий КПД печи складывается из двух составляющих: КПД сгорания и КПД печи. Снижение производительности печи на 1% может происходить из-за увеличения избытка кислорода на 2% и повышения температуры дымовых газов на 23-25 ° С. Чтобы свести потери к минимуму, необходимо минимизировать избыток воздуха и снизить температуру дымовых газов. Для этого нужно максимально уменьшить избыток подачи кислорода в горелки.

Измерение содержания CO в дымовых газах является наиболее адекватной мерой контроля.

Теоретически CO должен быть равен нулю при наличии O_2 в дымовых газах. Но на практике это не так, и максимальная производительность может поддерживаться при уровне CO от 100 до 200 ppm. Принимая во внимание нормативные ограничения, налагаемые на CO, мы будем регулировать концентрацию CO ниже этих пределов, и приближаться к оптимальному диапазону рабочих характеристик. Для природного газа в качестве газообразного топлива оно должно составлять 50-60 ppm. CO может стать чувствительным индикатором плохо отрегулированной горелки, если его концентрация повышается до 1000 ppm, это надежный сигнал о небезопасных условиях ее работы. С другой стороны CO - это степень и показатель завершения сгорания топлива. На него не влияет инфильтрация воздуха, а действует только разбавляющий эффект по реакции Белла-Будуара с образование CO_2.

Использование текущих данных анализа дымовых газов при управлении горелками позволяет действовать следующим образом.

- Контроль O_2 достигается путем управляющего воздействия на установки регулирования до определенного содержания избыточного воздуха (через воздуходувки) на основе измерения процентного содержания кислорода. В условиях предыдущего анализа установливают, какое должно быть избыточное количество O_2, чтобы потери в топке были минимальными. Заданное ПО количество O_2, которое в основном зависит от потребности в общем тепловом состоянии отражательной печи. При этом добавляется небольшой запас прочности (от 3 до 4% избыточного воздуха), чтобы справиться с колебаниями подачи газа в горелки.

- Оптимальное количество CO в промилле для каждого значения загрузки следует определять на основе текущих тестов, проведенных в печи. Количество CO устанавливается в зависимости от нагрузки, и может быть изменено вручную регулятором подачи.

Алгоритм работы данного программного комплекса представлен на рисунке 4.6.

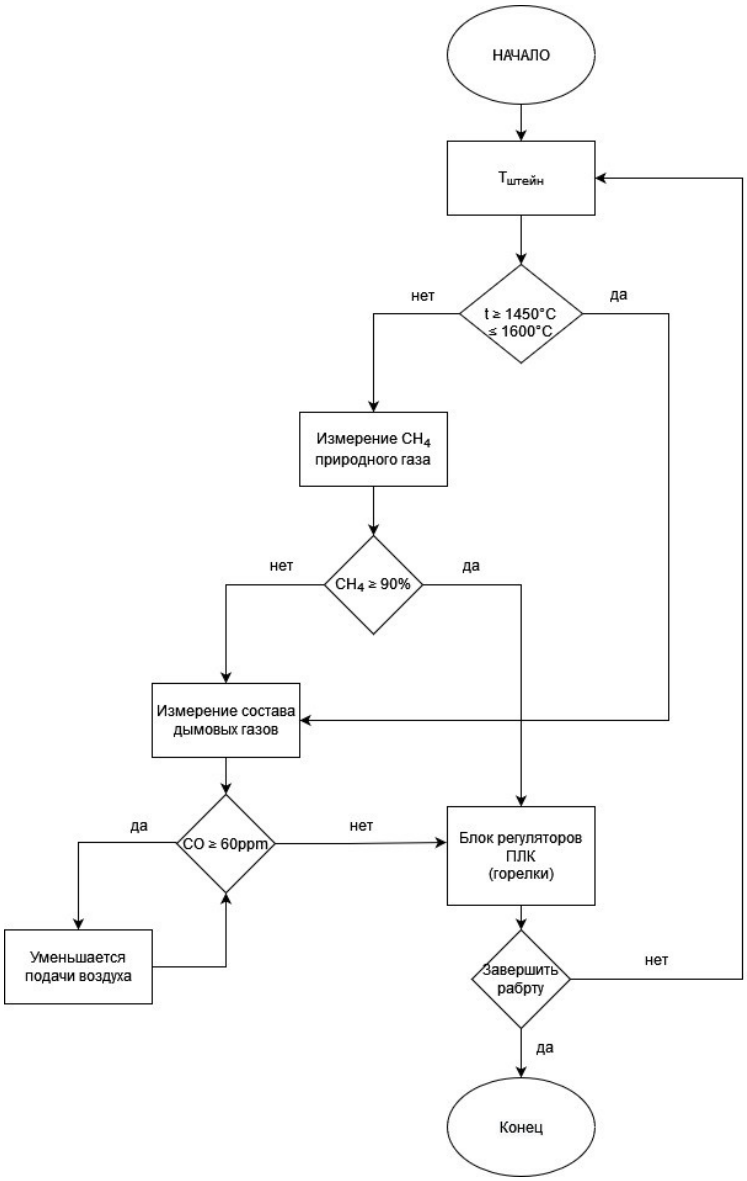


Рисунок 4.6 – Алгоритм работы программы управления горелкой

4.2 Разработка программы для ЭВМ: «Программа цифрового автоматизированного контроля тепловым режимом газовых отражательных печей при огневом рафинировании никеля»

Для разработки программы ЭВМ использовалась экспериментальная физическая модель (цифровой двойник), разработанная для изучения влияния режимов автоматизированного контроля и регулирования газовыми горелками на технологические параметры плавки при огневом рафинировании никеля [37].

В настоящее время в металлургических процессах, связанных с получением черновой меди и никеля, применяют отражательные печи с газовыми горелками среднего давления [92]. Помимо экологических требований к использованию природного газа, его состав влияет на эффективность работы печи, которая должна обеспечивать устойчивый энергетический и материальный баланс, а также качество самого чернового никеля, в случае перехода продуктов горения в состав расплава и несанкционированных выбросов в атмосферу.

Разработка и внедрение системы автоматизации отражательных печей для эффективного нагрева и плавления требует понимания различных побочных процессов, таких как сжигание природного газа, связано с общими вопросами декарбонизации металлургических производств. Для решения задачи необходимо обосновать эти процессы для получения рациональных параметров для энерго- и ресурсосбережения с прохождением информационного потока через адаптированный цифровой двойник [86]. Сущность отражательной плавки на штейн рудных концентратов и рудной мелочи заключается в том, что шихта плавится за счет тепла от сжигания углеродсодержащего топлива в газовом пространстве над ванной расплава в печи с горизонтально расположенным рабочим пространством (рисунок 4.7).

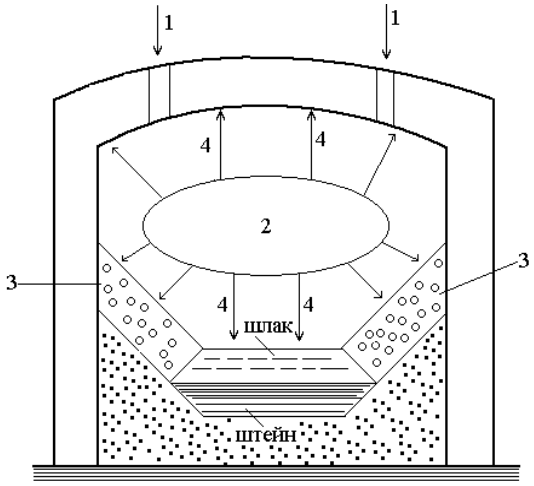


Рисунок 4.7 – Схема плавления шихты на боковых сторонах отражательной печи: 1 – загрузка шихты; 2 – факел горящего топлива; 3 – шихтовой откос; 4 – направления потоков теплоизлучения от факела горелки.

В рассматриваемом варианте шихту загружают в расплав (НЗП) на боковые стороны через откосы печи, расположенные на одном конце печи. Раскаленные топочные газы проходят по поверхности расплава (болота) и шихты, нагревают их, в том числе стены боковой футеровки и свод. Эти газы выходят из печи даже при относительно высокой температуре (900-1000^{o}C). Передача тепла в печи происходит в основном за счет излучения горячих стен и свода. Таким образом, при достижении заданной температуры шихта начинает плавится, и металлы, обладающие высоким сродством к кислороду, концентрируются в шлаке в виде оксидов. Никелевый расплав, переходит в штейн, поскольку имеет низкую взаимную растворимость при различной плотности (плотность штейна ≈5 т/м3, а шлака – ≈3 т/м^3), поэтому, продукты плавки при отстаивании разделяются на два слоя: шлак находится сверху и сливается через верхнюю летку или снимается, а расплав никеля снизу через сливное отверстие рядом с подиной.

В отражательной печи в качестве топлива используется природный газ, который поступает в рабочее пространство через горелки, которые установлены на одном торцевом конце печи. Воздух для горения подается в топку с помощью принудительной вентиляции. Температура в зоне плавления печи достигает 1550°C.

Тепло отходящих газов регенерируется в котле-утилизаторе, расположенном на пути прохождения газов в систему газохода за топкой. На этом участке можно снизить температуру газов до 300-400°C. Часть дымовых газов удаляется через специальный отвод дымовых газов, проходящий через котел-утилизатор или рекуператор. Для этого, заслонки (охлаждаемые водой) устанавливаются перед котлом и в байпасе. После окончания плавки и отстаивания расплава, шлак выпускается через летку в задней торцевой стенки печи, а штейн направляется через литниковую систему, через отверстие в боковых стенках футеровки в районе подины 20-30 см. Выпуск штейна и шлака осуществляется периодически в заданные интервалы времени.

Структура и функционирование программного обеспечения

При создании экспериментальной схемы отражательной печи (цифрового двойника), возникает необходимость в разработке цифрового программного обеспечения, способного обрабатывать данные, полученные в производственных условиях плавки. Программное обеспечение разработано в среде Unity XL Pro от компании Schneider Electric, при помощи которой можно программировать процесс в визуальной среде, с использованием накопления информации BigData и управлять процессом через цифровой двойник на 3 уровне АСУ ТП [32].

Программное обеспечение состоит из следующих продуктов (рисунок 4.8):

1. Блока питания BMXCPS3500;
2. Универсального контроллера Modicon M580 ePAC – первый программируемый контроллер автоматизации;
3. Цифрового модуля дискретного ввода BMXDDI 1602, количество дискретных входов: 16;

4. Модуля цифрового дискретного вывода BMXDRA0804, количество дискретных входов: 8 в соответствии с EN/IEC 61131-2;
5. Цифрового модуля аналоговых входов BMXAMI0810H, количество аналоговых входов: 8;
6. Цифрового модуля аналогового вывода BMXAMO0802.

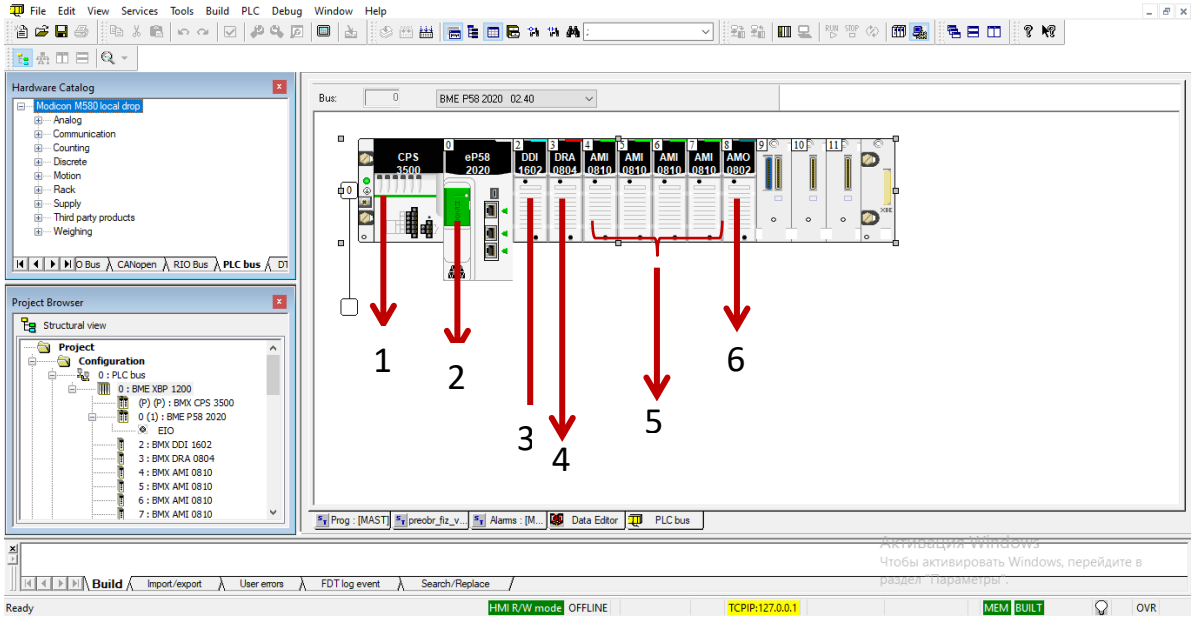


Рисунок 4.8 – Окно цифрового двойника с программным обеспечением компании Schneider Electric

В результате создана экспериментальная цифровая модель контроля тепловым режимом газовых отражательных печей при огненном рафинировании никеля. Экспериментальная цифровая модель (двойник) состоит из:

1. Сетки программирования на основе структурированного языка (ST) (рисунок 4.9);

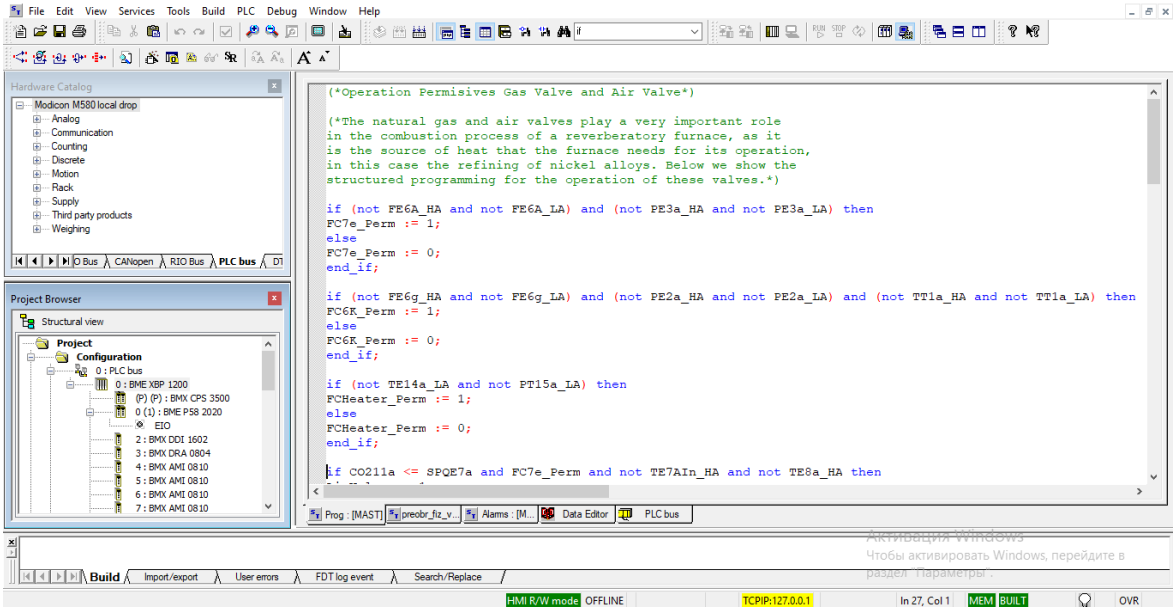


Рисунок 4.9 – Цифровой блок кода в Unity XL Pro

2. Блока настройки сигнализации прогноза отклонений и предупреждения аварии (рисунок 4.10);

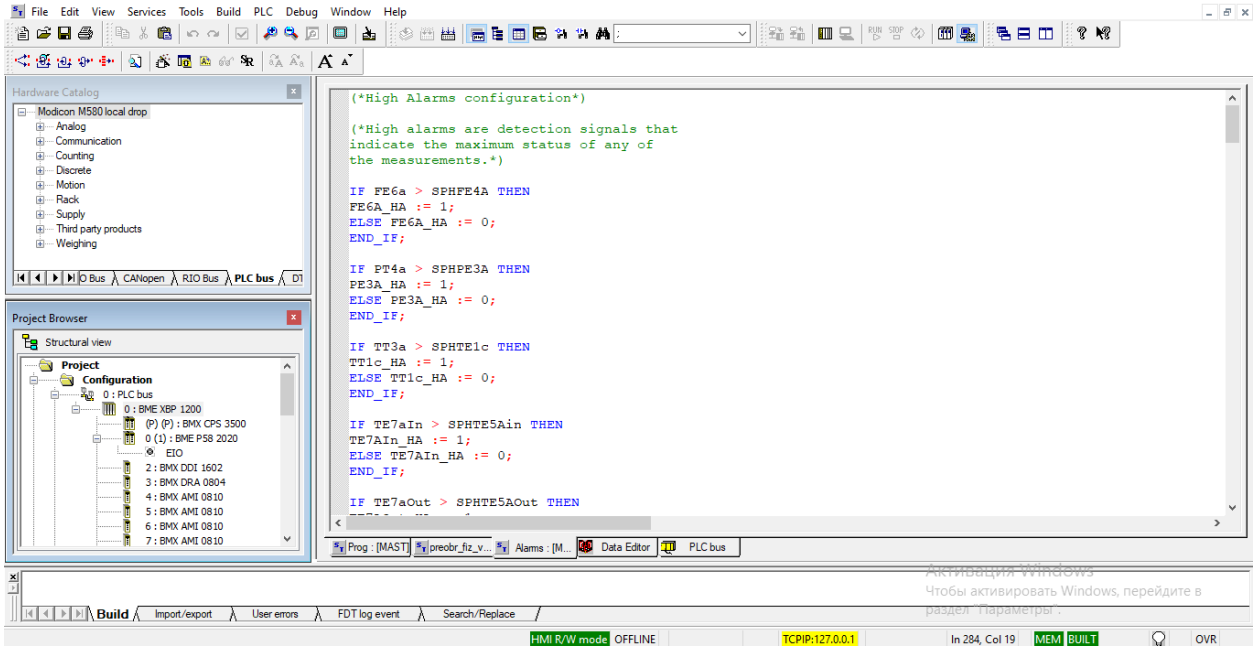


Рисунок 4.10 – Блок настройки сигнализации в Unity XL Pro

3. Пропорционального, интегрального и производного контроллеров (ПИД-регуляторы) для управления природным газом, воздухом, температурой печи и входной нагрузкой (рисунок 4.11);

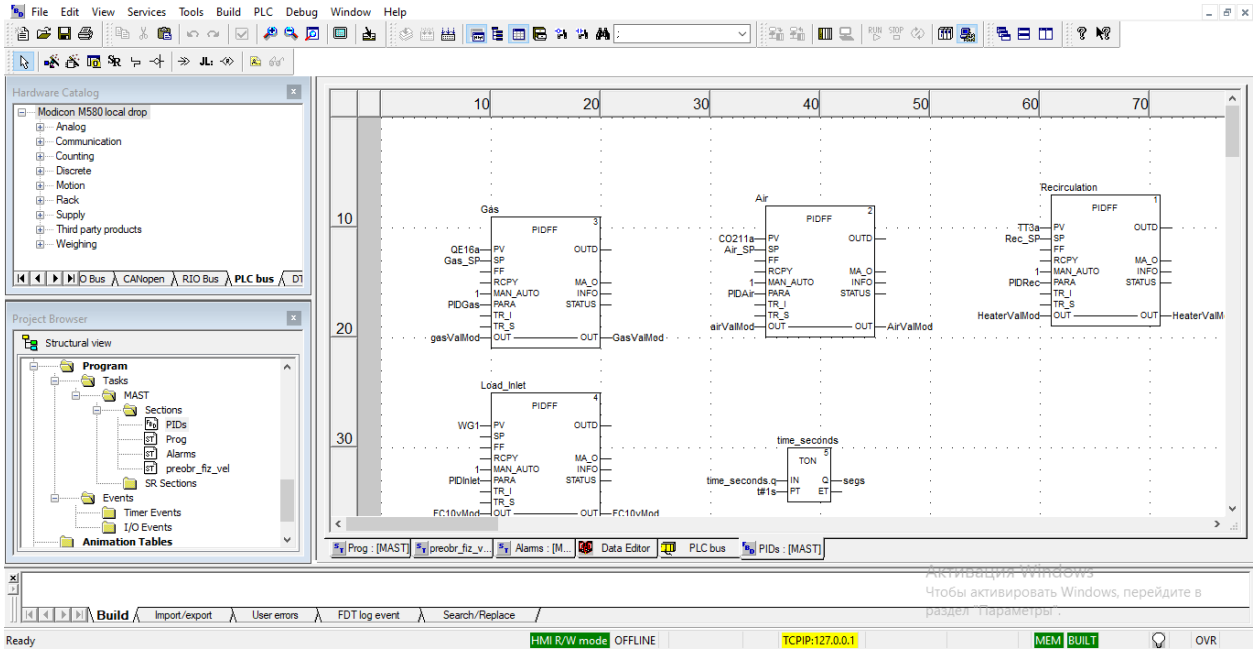


Рисунок 4.11 – ПИД-регуляторы в среде Unity XL Pro

4. Расчета для получения вещественных чисел - цифровых данных двойника (рисунок 4.12);

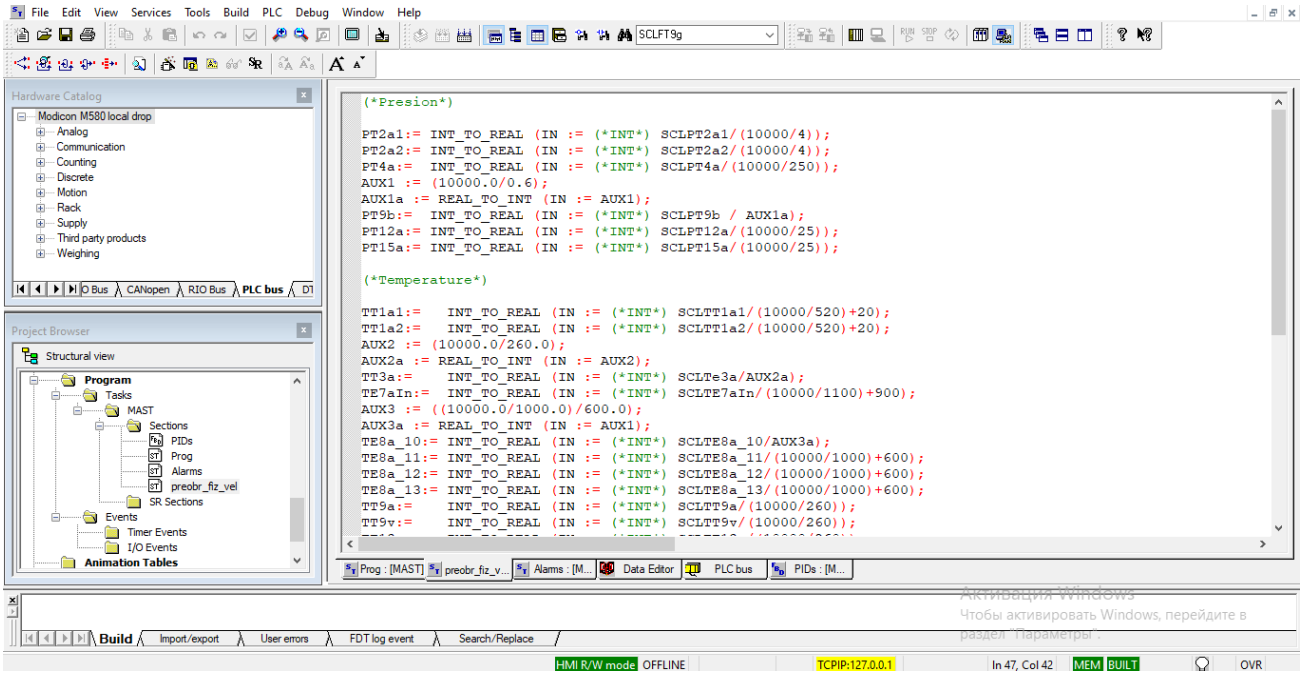


Рисунок 4.12 – Расчет вещественных чисел в Unity XL Pro для цифрового двойника

Программа обеспечивает выполнение функций управления клапанами горелок природного газа и воздуха, с учетом технологической ситуации в печи во время всего процесса плавления шихты, за счет оперативного вмешательства и использования накопленной информации BigData для параллельного управления цифровым двойником, встроенного в систему АСУ.

4.3 Экономические расчеты за счет оптимизации работы горелки

Экономическая эффективность была рассчитана после регулировки подачи избыточного воздуха и давления в горелке для оптимизации условий работы печи ОП [71]. Данные полученные перед и после настройки переменных и параметров можно увидеть в таблице 4.1.

Таблица 4.1 –Параметры настройки и регулирования подачи избыточного воздуха в горелке

Переменные значения	Перед	После
Кислород, %	7,1	2,9
Температура, ºС	222	198

На рисунке 4.13 определены расходные данные с учетом поправок на экономию и затраты природного газа.

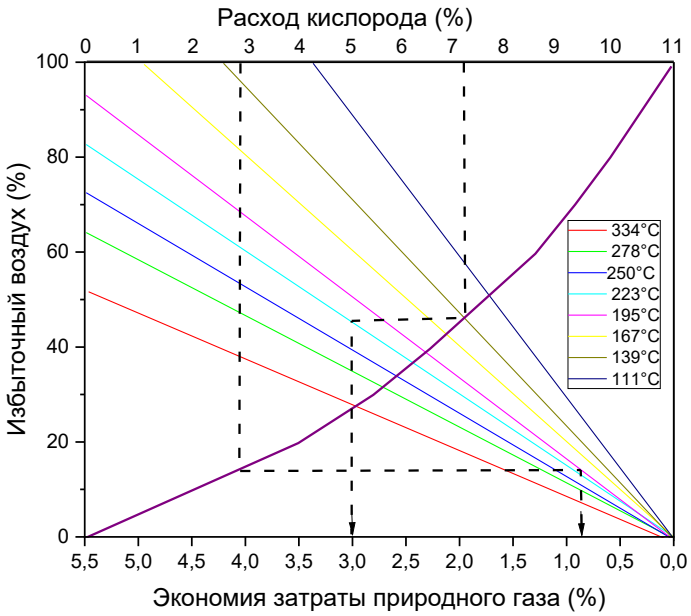


Рисунок 4.13 – Результаты расчетов экономии природного газа в зависимости от расходных статей (равна 3-0,7%=2,3%

Показатели эффективности процесса горения в горелках среднего давления до и после внесенных регулировок представлены на рисунке 4.14.

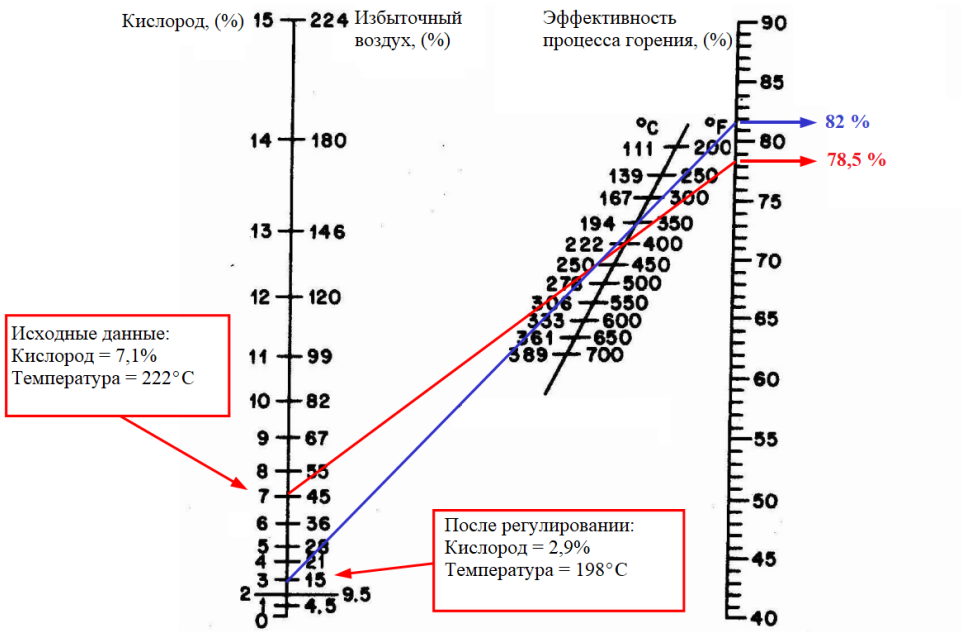


Рисунок 4.14 – Расчетная экономия природного газа равна 3-0,7%=2,3%

Из ранее полученных зависимостей можно рассчитать экономию от повышения производительности горелки и самой печи [71]. Приведены расчеты на каждые 100 евро

стоимости природного газа за счет повышения эффективности сгорания топлива в таблице 4.2. с учетом радиационных потерь на излучение.

Таблица 4.2 – Изменение экономической эффективности на приведенную стоимость природного газа

Начальные значения	Полученная эффективность								
	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
50%	9,10	16,70	23,10	28,60	33,30	37,50	41,20	44,40	47,40
55%	–	8,30	15,40	21,50	26,70	31,20	35,30	38,90	42,10
60%	–	–	7,70	14,30	20,00	25,00	29,40	33,30	37,80
65%	–	–	–	7,10	13,30	18,80	23,50	27,80	31,60
70%	–	–	–	–	6,70	12,50	17,60	22,20	26,30
75%	–	–	–	–	–	6,30	11,80	16,70	21,10
80%	–	–	–	–	–	–	5,90	11,10	15,80
85%	–	–	–	–	–	–	–	5,60	10,50
90%	–	–	–	–	–	–	–	–	5,30

С учетом роста курса евро с 78,5% до 82%.

с 75% до 80% = 6,30

с 78,5% до 80% = 1,89

с 80% до 85% = 5,90

с 80% до 82% = 2,36

1,89 + 2,36 = 4,25 евро

Текущая экономия составляет 4,25 евро на каждые 100 евро при покупке одного кубометра природного газа.

4.4 Выводы по четвертой главе

В четвертой главе диссертационной работы представлена схема система контроля и разработан алгоритм управления горелками отражательных печей, а также дано описание систем автоматического контроля и регулирования ОП.

1.Установлено, что содержание оксида углерода CO в дымовых газах во время плавки является индикатором для управляющих воздействий по регулированию газовыми горелками. При рациональном режиме горения повышается эффективность использования топлива при минимальном содержании избыточного воздуха в природном газе, который должен быть в интервале от 3 до 15% при 50-60 ppm CO.

2. Разработан программный комплекс (№2021615658), который позволяет повысить производительность отражательных печей на 10-15% с учетом содержания метана в газе, при текущем анализе данных о составе дымовых газов в атмосфере печи.

3. Повышение экономической эффективности отражательных печей для процесса огневого рафинирования достигается при рациональном использовании компонентов природного газа с учетом режимов плавки при снижении удельного расхода природного газа на 1 тонну никеля на 4,25%.

В результате анализа обработанных данных сформулировано следующее научное положение:

Снижение безвозвратных потерь металла во время огневого рафинирования на 4-5% достигается с помощью разработанного алгоритма контроля и управления тепловым режимом отражательной печи с учетом заданных параметров содержания метана в природном газе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи – повышение эффективности контроля и управления тепловым режимом отражательных печей за счет рациональной подачи природного газа при огневом рафинировании никеля.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведенное аналитическое исследование процесса огневого рафинирования указывает на необходимость функциональных связей с учетом обоснования дополнительных контролируемых параметров плавки (состав и давление природного газа, температура воздуха для горения топлива, состав дымовых газов, тепловые потери) для обеспечения снижения энергетических затрат на 8-10%.

2. Установлено влияние состава природного газа на величину теплового КПД и температуры процесса с учетом показателя его теплотворной способности на основе разработанного программного комплекса (№2020665700).

3. По результатам проверки разработанной комбинированной модели CFD печи при различном расположении газовых горелок для улучшения рециркуляции отходящих газов доказано, что чем больше содержание метана в природном газе, тем выше его теплотворная способность для обеспечения равномерного нагрева расплава с учетом конфигурации элементов конструкции печи и ее футеровки.

4. Определено, что изменение содержания компонентов расплава не является линейным, а полученная кинетическая модель указывает, на то, что, степень очистки от примесей линейно зависит от температуры отходящих газов отражательной печи.

5. Установлено, что содержание оксида углерода CO в дымовых газах во время плавки является индикатором для управляющих воздействий для регулирования газовыми горелками. Повышается эффективность использования топлива при минимальном содержании избыточного воздуха для процесса горения природного газа, который должен быть в интервале от 3 до 15% при 50-60 ppm CO.

6. Разработан программный комплекс (№2021615658), который позволяет повысить производительность отражательных печей на 10-15% за счет контроля содержания метана в природном газе при текущем анализе состава дымовых газов в атмосфере печи.

7. Повышение экономической эффективности отражательных печей для процесса огневого рафинирования достигается при рациональном использовании компонентов природного газа с учетом режимов плавки при снижении удельного расхода природного газа на 1 тонну никеля на 4,25%.

В дальнейшем планируется продолжение работы в рамках НИР, связанных с модернизацией никелевого производства, внедрением MES-систем для повышения информативности, контроля основных и вспомогательных производственных параметров, которые используются для управления современным предприятием.

С учетом того, что цена никеля на Лондонской бирже металлов впервые превысила 100000 долларов за тонну (данные торгов на 8 марта 2022 года), организация производства никеля и его сплавов улучшит экономику стран Латинской Америки, таких как Куба, Эквадор, Бразилия и Венесуэла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков, А.Б. Современные аспекты использования регенеративных горелок для отопления пламенных печей / А.Б. Бирюков // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2015. – № 11. – С. 31–36.

2. Богданов, Р.А. Автоматизация литейных печей : учебное пособие / Р.А. Богданов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 160 с. :, табл. ISBN 978-9729-0713-7

3. Василик, Н.Я. Горение смесей природного газа с воздухом на поверхности рекуперационной матрицы / Н.Я. Василик, В.М. Шмелев // Горение и взрыв. – 2017. – № 2. – С. 4–8.

4. Виноградов, В.М. Автоматизация технологических процессов и производств. Введение в специальность : учебное пособие / В.М. Виноградов, А.А. Черепахин. — Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2021. — 161 с.

5. Евтушенко, Н.Ю. Рафинирование вторичного никеля / Н.Ю. Евтушенко, Г.Г. Корицкий // Металлургия XXI Столетия Глазами Молодых. – 2019. – С. 60–63.

6. Калякулин, С.Ю. Автоматизация контроля параметров плавки / С.Ю. Калякулин, Э.В. Митин, Т.В. Травкина // Материалы научной конференции: В 3-х частях. – 2018. – С. 150–154.

7. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Математические расчеты теплового баланса отражательной печи при плавке никелевых сплавов / Кирос Кабасканго В.Э., Бажин В.Ю. // Сборник научных статей по итогам XVI Международной форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования». – 2020. – № 1. – С. 261–262.

8. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Оптимальное управление температурными режимами жидкого металла в газовых отражательных печах для плавления никелевых сплавов / В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин // Материалы XIV Международной научно–практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». – Москва, 2019. – № 4. – С. 74–77.

9. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Восстановление оксида никеля в газовых смесях CO/CO2 в отражательных печах / В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин // Сборник научных статей по итогам VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020». – 2019. – № 12. – С. 192–194.

10. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Моделирование газовых потоков в горелках отражательных печей для снижения уровня оксида азота / В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин // Материалы XI Всерос. науч.-практ. конф.с междунар. участием «Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов». – 2021. – С. 23–26.

11. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Моделирование газовых потоков горелок отражательных печей с низким уровнем выбросов NO_2 в производстве никелевых / Кирос Кабасканго, В.Э. // Сборник научных статей по итогам Международной семинара «Нанофизика и наноматериалы». – 2020.

– С. 157–162.

12. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Влияние состава природного газа на тепловой коэффициент полезного действия отражательной печи для никелевых сплавов / В.Э. Кирос Кабасканго // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2020. – № 5 (24). – С. 1159–1167.

13. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Управление параметрами газовых горелок отражательных печей горения при плавлении никельсодержащего сырья / В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин // Вестник иркутского государственного технического университета. – 2020. – № 1 (24). – С. 220–230.

14. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Система автоматического управления тепловым состоянием отражательных печей для производства никелевых сплавов / В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин, С.А. Мартынов, Ф.Р. Охеда Пардо // Журнал Металлург. – 2022. – С. 85–93. DOI:10.52351/00260827_2022_01_85

15. Колесников, Г.К. Автоматизация технологических процессов горно-металлургических производств / Г.К. Колесников, Г.И. Тупицин // Цветные Металлы. – 2015. – С. 47–53.

16. Комаров, И.И. Исследование химической кинетики процессов горения природного газа с кислородом в камерах сгорания газовых турбин на сверхкритическом диоксиде углерода / И.И. Комаров, Д.М. Харламова, А.Н. Вегера // Новое в Российской Электроэнергетике. – 2021. – №2. – С. 20–28.

17. Кочетов, В.В. Математические модели процесса горения / В.В. Кочетов, Р.Н. Савченко, Р.С. Рамазанов // IX Международный Молодежный Форум «Образование. Наука. Производство». – 2017. – С. 1117–1121.

18. Кузнецов, В.А. Исследования эффективности сжигания природного газа в топках с подовыми горелками при переводе котлов с твердого топлива на природный газ / В.А. Кузнецов, Е.В. Шуршакова // Экология и строительство. – 2016. – №1. – С. 4–6.

19. Мессерле, В.Е. Плазмохимия и процессы горения / В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко // Горение и Плазмохимия. – 2017. – №15. – С. 113–122.

20. Николаенко, С.А., Автоматизация систем управления: учеб. пособие / С. А. Николаенко, Д. С. Цокур. – Краснодар: Изд-во ООО « Крон», – 2015. – 119 с.

21. Павлов, Е.С. 3Б-Численное моделирование процесса горения природного газа в горелке ГМ-10 // Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения». – 2020. – №17.

22. Пиляев, С.Н. Автоматизация технологических процессов / С.Н. Пиляев, Д.Н. Афоничев, В.А. – Черников. Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. – Воронеж. – 2016. – 240 с.

23. Ткаченко, А.В. Автоматизация технологических процессов : практикум по одноименному

курсу для студентов специализации 1- 42 01 01-01 02 «Электрометаллургия черных и цветных металлов» днев. и заоч. форм обучения / А. В. Ткаченко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2016. – 77 с.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666633 Российская Федерация. Программа контроля теплового баланса отражательной печи с учетом условий сжигания и состава природного газа: №2020665700: заявл. 03.12.2020: опубл. 11.12.2020 / **В.Э. Кирос Кабасканго**, В.Ю. Бажин; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный.

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616676 Российская Федерация. Программа цифрового автоматизированного контроля тепловым режимом газовых отражательных печей при огневом рафинировании никеля: №2021615658: заявл. 20.04.2021: опубл. 26.04.2021 / **В.Э. Кирос Кабасканго**, В.Ю. Бажин, М.Ю. Николаев; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский горный университет». – 1 с.: ил. – Текст: непосредственный

26. Alejandro Cruz, R. Thermodynamic analysis of the SiO2–NiO–FeO system / R. Alejandro Cruz, S. Antonio Romero, R. Marissa Vargas, L. Manuel Hallen // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2005. – № 16. – P. 1359–1365. – DOI:10.1016/j.jnoncrysol.2005.03.008.

27. Assis, A.N. Spontaneous Emulsification of a Metal Drop Immersed in Slag Due to Dephosphorization: Surface Area Quantification / A.N. Assis, J. Warnett, S. Spooner, R.J. Fruehan, M.A. Williams, S. Sridhar // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2015. – № 2. – P. 568–576. – DOI:10.1007/s11663-014-0248-z.

28. Bains, P. CO2 capture from the industry sector / P. Bains, P. Psarras, J. Wilcox // Progress in Energy and Combustion Science. – 2017. – № 9. – P. 146–172. – DOI:10.1016/j.pecs.2017.07.001

29. Ballester, A. Metalurgia extractiva Volumen I / L.F. Verdeja, J. Sancho. – Мадрид ; Fundamentos : Editorial Síntesis, 2000. – 189 p.

30. Barati, M. Energy recovery from high temperature slags / M. Barati, S. Esfahani, T. Utigard // Energy. – 2011. – № 9. – P. 5440–5449. – DOI:10.1016/j.energy.2011.07.007

31. Bazhin, V.Y. New methods of processing of Cuban nickel ores and technogenic slimes / V.Y. Bazhin, A.N. Nikolaev, A.B. Turro // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 862. – P. 032072. – DOI:10.1088/1757-899X/862/3/032072

32. Beloglazov, I.I. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry / I.I. Beloglazov, P.A. Petrov, V.Yu. Bazhin // Eurasian Mining. – 2020. – № 2. – P. 50–54. – DOI: 10.17580/em.2020.02.12

33. Beloglazov, I.I. Development of an algorithm for control metallurgical processes of fluidized roasting using an adaptive controller / I.I. Beloglazov, P.A. Petrov, D.V. Gorlenkov // Journal of

Physics: Conference Series. – 2018. – № 1059. – P. 012015. – DOI:10.1088/1742-6596/1059/1/012015

34. Bogusz, A. High Temperature Diffusion Processes at the Metal/Slag Interface / A. Bogusz, P.J. Masset // Defect and Diffusion Forum. – 2012. – № 323–325. – P. 115–120. – DOI:10.4028/www.scientific.net/DDF.323-325.115

35. Bohlooli Arkhazloo, N. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace / N. Bohlooli Arkhazloo, Y. Bouissa, F. Bazdidi-Tehrani, M. Jadidi, J. B. Morin, M. Jahazi // Case Studies in Thermal Engineering. – 2019. – № 14. – P. 100428. – DOI:10.1016/j.csite.2019.100428

36. Borate, M. Industrial furnace optimization by robust design for efficiency upgradation and adaptability to different loads / M. Borate, P.D. Deshmukh, A. Shetty // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. – 2021. – № 2. – P. 477–483. – DOI: 10.1007/s40032-020-00656-6

37. Boschert, S. Digital Twin—The Simulation Aspect / S. Boschert, R. Rosen ; Cham: Springer International Publishing. – Bradley. – 2016. 59–74 p.

38. Bozzano, G. Efficient methanol synthesis: Perspectives, technologies and optimization strategies / G. Bozzano, F. Manenti // Progress in Energy and Combustion Science. – 2016. – № 56. – P. 71–105. – DOI:10.1016/j.pecs.2016.06.001

39. Brimmo, A. Furnace Modeling for Efficient Combustion Gas Circulation / A. Brimmo, M. Hassan // Light Metals. – 2016. – P. 757–761.

40. Cardona Valencia, N.C. Contribución al análisis fisicoquímico de las pérdidas de cobre en escorias:. диссертация ... канд. ист. наук: / Cardona Valencia, Nubia del Carmen. – Chile, 2011. – 312 p.

41. Carlucci, C. Properties of Aluminosilicate Refractories with Synthesized Boron-Modified TiO 2 Nanocrystals / C. Carlucci, F. Conciauro, B.F. Scremin, A.G. Antico, M. Muscogiuri, T. Sibillano // Nanomaterials and Nanotechnology. – 2015. – № 5. – P. 1–8. – DOI:10.5772/60204

42. Coley, K. Progress in the kinetics of slag-metal-gas reactions, past, present and future / K. Coley // Journal of Mining and Metallurgy. – 2013. – № 2. – P. 191–199. – DOI:10.2298/JMMB121220017C

43. Damanik, N. A review on the engine performance and exhaust emission characteristics of diesel engines fueled with biodiesel blends / N. Damanik, H.C. Ong, C.W. Tong, T.M.I. Mahlia, A.S. Silitonga // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – № 16. – P. 15307–15325. – DOI:10.1007/s11356-018-2098-8

44. Demotica, J. Characterization and leaching assessment of ferronickel slag from a smelting plant in Iligan City, Philippines / J. Demotica, R. Amparado // International Journal of Environmental Science and Development. – 2012. – № 5. – P. 470–474. – DOI:10.1007/s11356-018-2098-8

45. Durinck, D. Hot stage processing of metallurgical slags / D. Durinck, F. Engström, S. Arnout, J.

Heulens, P.T.Jones, B. Björkman // Resources, Conservation and Recycling. – 2008. – № 10. – P. 1121–1131. – DOI:10.1016/j.resconrec.2008.07.001

46. Elliott, R. A two-stage thermal upgrading process for nickeliferous limonitic laterite ores / R. Elliott, F. Rodrigues, C.A. Pickles, J. Peacey // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2015. – № 4 (54). – P. 395–405. – DOI:10.1179/1879139515Y.0000000009

47. Ettler, V. Leaching behaviour of slag and fly ash from laterite nickel ore smelting (Niquelândia, Brazil) / V. Ettler, J. Kvapil, O. Šebek, Z. Johan, M. Mihaljevič, G. Ratié // Applied Geochemistry. – 2016. – № 64. – P. 118–127. – DOI:10.1016/j.apgeochem.2015.09.019

48. Fetisov, V.G. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems / V.G. Fetisov, A.K. Nikolaev, Y.V. Lykov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 327. – P. 022033. – DOI:10.1088/1757-899X/327/2/022033

49. Gondaliya, V. Transient Heat transfer Analysis of Induction Furnace by Using Finite Element Analysis / V. Gondaliya, M. Pujara, N. Mehta // Indian Journal of Applied Research. – 2011. – № 8 (3). – P. 231–234. – DOI:10.15373/2249555X/AUG2013/75

50. Góngora, D.M. Post-combustion artificial neural network modeling of nickel-producing multiple hearth furnace / D.M. Góngora, J.Van.Caneghem, D. Haeseldonckx, E.G. Leyva, M.R. Mendoza, A. Dutta // International Journal of Chemical Reactor Engineering. – 2020. – № 7 (18). – P. 231-234. – DOI:10.15373/2249555X/AUG2013/75

51. Guo, Y. Research on the slag phase type of vanadium-titanium magnetite in pre-reduction-electric furnace smelting / Y. Guo, M. Tang, T. Jiang, L. Qing // 4th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. – 2013.– P. 87–94.

52. Hassan, M. и Brimmo, A. CFD comparison of immersed heater and open fire burner designs for casting furnaces / M. Hassan, A. Brimmo // Light Metals. – 2015. – P. 915–920.

53. Hernández, Y. Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from “Cerro Matoso” Mine (Colombia) / Y. Hernández, J. Carriazo, O. Almanza // Materials characterization. – 2006. – № 1 (57). – P. 44–49.

54. Ivanova, V. Stand for Studying the Bases of Automation of Technological Processes of Industrial Enterprises IEEE / V.R. Ivanova, I.Y. Ivanov, N.V. Rozhentsova // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies. – 2020. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271420.

55. Jak, E. Slag phase equilibria and viscosities in ferronickel smelting slags / E. Jak, P.C. Hayes // The Twelfth International Ferroalloys Congress. – 2010. – № 123. – P. 631–640.

56. Jiang, M.,Sun, T.,Liu, Z.,Kou, J.,Liu, N.,и Zhang, S. Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process / M. Jiang, T. Sun, Z. Liu, J. Kou, N. Liu, S. Zhang // International Journal of Mineral Processing. – 2013. – № 123. – C. 32–38.

57. Jouhari, A.K. Kinetics of iron oxide reduction in molten slag / A.K. Jouhari, R.K. Galgali, P. Chattopadhyay, R.C. Gupta, H.S. Ray // Scandinavian Journal of Metallurgy. – 2001. – № 1 (30). – P. 14–20. – DOI:10.1034/j.1600-0692.2001.300103.x

58. Keskinkilic, E. Nickel Laterite Smelting Processes and Some Examples of Recent Possible Modifications to the Conventional Route / E. Keskinkilic // Metals. – 2019. – № 9 (9). – P. 974. – DOI:10.3390/met9090974

59. Kiedrzyńska, A. Numerical study of natural gas and low-calorific syngas co-firing in a pilot scale burner / A. Kiedrzyńska, R. Lewtak, B. Świątkowski, P. Jóźwiak, J. Hercog, K. Badyda // Energy. – 2020. – № 211. – P. 118552. – DOI:10.1016/j.energy.2020.118552

60. Kim, S.J. A Kinetic Model to Simulate the Reaction Between Slag and Matte for the Production of Ferromanganese Alloy from Steelmaking Slag / S.J. Kim, J. Suzuki, X. Gao, S. Ueda, S. Kitamura // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – № 2 (2). – P. 141–151. – DOI:10.1007/s40831-016-0042-z

61. Kupczak, K. Chemical and Phase Reactions on the Contact between Refractory Materials and Slags, a Case from the 19th Century Zn-Pb Smelter in Ruda Śląska, Poland / K. Kupczak, R. Warchulski, M. Dulski, D. Środek // Minerals. – 2020. – № 11(10). – P. 1006. – DOI: 10.3390/min10111006

62. Li, N. Interaction of High Al2O3 Refractories with Alkaline Salts Containing Potassium and Sodium in Biomass and Waste Combustion / N. Li, E. Vainio, L. Hupa, M. Hupa, E.C. Zabetta // Energy & Fuels. – 2018. – № 12(32). – P. 12971–12980. – DOI:10.1021/acs.energyfuels.8b03136

63. Litvinenko, V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector / V.S. Litvinenko // Natural Resources Research. – 2020. – № 3 (29). – P. 1521–1541. – DOI: 10.1007/S11053-019-09568-4

64. Liu, F. Nickel oxide as an effective catalyst for catalytic combustion of methane / F. Liu, Y. Sang, H. Ma, Z. Li, Z. Gao // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – № 41. – P. 1–6. – DOI:10.1016/j.jngse.2017.02.025

65. Mamalis, S. Low-Temperature Natural Gas Combustion Engines / S. Mamalis // Natural Gas Engines. – 2019. – № 1 – P. 7–27. – DOI:10.1007/978-981-13-3307-1_2

66. Marzoughi, O. Mechanism of carbothermic reduction of a sulfur-containing nickeliferous limonitic laterite ore / O. Marzoughi, W. Anthony, F. Rodrigues, R. Elliott, J. Peacey, C.A. Pickles // Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy. – 2020. – № 3 (129). – P. 267–281. – DOI:10.1080/25726641.2018.1504660

67. McCullough, E. и Nassar, N.T. Assessment of critical minerals: updated application of an early-warning screening methodology / E. McCullough, N.T. Nassar // Mineral Economics. – 2017. – № 3 (30). – P. 257–272. – DOI:10.1007/S13563-017-0119-6

68. Mentsiev, A.U. Automation and control of thermal processes in the furnace / A.U. Mentsiev, I.A. Mutaev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 1 (734). – P. 012212. – DOI:10.1088/1757-899X/734/1/012212

69. Mistry, M. Life cycle assessment of nickel products / M. Mistry, J. Gediga, S. Boonzaier // The International Journal of Life Cycle Assessment. – 2016. – № 11 (21). – P. 1559–1572. – DOI: 10.1007/s11367-016-1085-x

70. Mondal, S. Structural characterisation of lateritic nickel ore of Indian origin / S. Mondal, A. Sinha, T. Sreenivas, V. Kain // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2019. – № 3(130). – P. 1–6. – DOI:10.1080/25726641.2019.1597561

71. Mosquera Urbano, A.P. Improving energy efficiency in the Republic of Ecuador / A.P. Mosquera Urbano, T.P. Ponomorenko // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. – 2020. – № 2 (5). – P. 285–292.

72. Mu, W. Desiliconization kinetics of nickeliferous laterite ores in molten sodium hydroxide system / W. Mu, Y. Zhai // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2010. – № 2 (20). – P. 330–335.

73. Overchenko, M. Quality improvement of mining specialists tarining on the basis of cooperation between Saint-Petersburg mining university and Orica company / M. Overchenko, M. Marinin // Записки Горного института. – 2017. – № 228. – P. 681–687. – DOI:10.25515/PMI.2017.6.681

74. Oxley, A. Hydro–pyro integration in the processing of nickel laterites / A. Oxley, N. Barcza // Minerals Engineering. – 2013. – № 54. – P. 2–13. – DOI:10.1016/j.mineng.2013.02.012

75. Park, H.S. Novel design of ferronickel smelting slag by utilizing red mud as a fluxing agent: Thermochemical computations and experimental confirmation / H.S. Park, M.C. Ha, M.S. Kim, J.H. Heo, J.H. Park // Calphad. – 2017. – № 56. – P. 185–195. – DOI:10.1016/j.calphad.2017.01.006

76. Peng, X. Temperature prediction model of two-layer cascade control industrial furnace based on PFC-FLC-DE / X. Peng, S. Xie, L. Chen, D. Wang // Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering. – 2017. – № 3 (17). – P. 481–495. – DOI:10.3233/JCM-170736

77. Pickles, C. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore / C. Pickles, C. Harris, J. Peacey // Minerals Engineering. – 2013. – № 54. – P. 52–56.

78. Pickles, C.A. Thermodynamic analysis of selective reduction of nickeliferous limonitic laterite ore by carbon monoxide / C.A. Pickles, R. Elliott // Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2015. – № 4 (124). – P. 208–216. – DOI:10.1179/1743285515Y.0000000009

79. Pillai, R. Methods to increase computational efficiency of CALPHAD-based thermodynamic and kinetic models employed in describing high temperature material degradation / R. Pillai, T. Galiullin,

A. Chyrkin, W. Quadakkers // CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2016. – (53). – P. 62–71. – DOI:10.1016/j.calphad.2016.03.004

80. Pivinsky, Y.E. Cement-Free Refractory Concretes. Part 2. High-Alumina and Corundum Ceramic Concretes 1 / Y.E. Pivinsky, P.V. Dyakin, E.M. Grishpun, A.M. Gorokhovsky // Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – № 6 (60). – P. 566–573. – DOI:10.1007/s11148-020-00408-0

81. Popovic, D. Distributed Computer Control Systems in Industrial Automation / D. Popovic, V.P. Bhatkar. – Routledge ; Taylor Francis, 2017. – 728 p. :, табл. 9-7813-1514-1404

82. Pourhoseini, S. Tangential Flue Gas Recirculation (TFGR) technique for enhancement of radiation characteristics and reduction of NOx emission in natural gas burners / S. Pourhoseini, I. Taghvaei, M. Moghiman, M. Baghban // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2021. – (94). – P. 104130. – DOI:10.1016/j.jngse.2021.104130

83. Pourhoseini, S.H. A novel configuration of natural gas diffusion burners to enhance optical, thermal and radiative characteristics of flame and reduce NOx emission / S.H. Pourhoseini // Energy. – 2017. – (132). – P. 41–48. – DOI:10.1016/j.energy.2017.04.167

84. Qin, W. Oxygen composition modulation effects on flame propagation and NOx formation in methane/air premixed flames / W. Qin, J.Y. Ren, F.N. Egolfopoulos, S. Wu, H. Zhang, T.T. Tsotsis // Proceedings of the Combustion Institute. – 2000. – № 2 (28). – P. 1825–1831. – DOI:10.1016/S0082-0784(00)80585-8

85. Quiroz Cabascango, V.E. Influence of the natural gas composition and flue gas recirculation in a reverberatory furnace for nickel alloys / V.E. Quiroz Cabascango, V.Yu. Bazhin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 3 (919). – P. 032027. – DOI:10.1088/1757-899X/919/3/032027

86. **Quiroz Cabascango, V.E.** Combustion optimization in gas burners of reverberatory furnaces during the melting of nickel alloys / V.E. Quiroz Cabascango, V.Yu. Bazhin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1 (1728). – P. 012019. – DOI:10.1088/1742-6596/1728/1/012019

87. **Quiroz Cabascango, V.E.** Nickel oxide reduction in CO/CO_2 gas mixtures in reverberatory furnaces / V.E. Quiroz Cabascango, V.Yu. Bazhin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – № 2 (1515). – P. 022028. – DOI:10.1088/1742-6596/1515/2/022028

88. **Quiroz Cabascango, V.E.** Thermal efficiency calculations of a reverberatory furnace during the nickel alloys melting / V.E. Quiroz Cabascango, V.Yu. Bazhin // Scientific Conference Abstracts of XVII International Forum-contest of students and young researches Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – 2021. № 1. – С. 152–153.

89. Ramírez, A.C. The solubility and activity determination of NiO in the SiO2–NiO–FeO system / A.C. Ramírez, A.R. Serrano, E.R. Salinas, A.R. López, M.V. Ramírez // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2008. – № 30 (354). – P. 3533–3539. – DOI:10.1016/j.jnoncrysol.2008.03.027

90. Ratié, G. Nickel isotope fractionation during laterite Ni ore smelting and refining: Implications for tracing the sources of Ni in smelter-affected soils / G. Ratié, C. Quantin, D. Jouvin, D. Calmels, V. Ettler, Y. Sivry // Applied Geochemistry. – 2016. – № 64. – P. 136–145. – DOI:10.1016/j.apgeochem.2015.09.005

91. Rezazadeh, N. Effect of burners configuration on performance of heat treatment furnaces / N. Rezazadeh, H. Hosseinzadeh, B. Wu // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – № 136. – P. 799–807. – DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.113

92. Shafiey Dehaj, M. Study of natural gas/air combustion in the three-region porous medium burner / M.Shafiey Dehaj, A. Arab Solghar // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – № 3 (41). – P. 137. – DOI:10.1007/s40430-019-1637-7

93. Shao, C. Low Temperature Complete Combustion of Lean Methane over Cobalt-Nickel Mixed-Oxide Catalysts / C. Shao, W. Li, Q. Lin, Q. Huang, D. Pi // Energy Technology. – 2017. – № 4 (5). – P. 604–610. – DOI:10.1002/ente.201600402

94. Sharikov, Y.V. Mathematical Simulation of the Process of Nickel Oxide Recovery in a Tube-Type Rotary Kiln / Y.V. Sharikov, L.Z. Feng // Metallurgist. – 2018. – № 7 (62). – P. 634–641. – DOI:10.1007/S11015-018-0702-2

95. Sharikov, Y.V. Mathematical modeling of mass, heat and fluid flow in a reverberatory furnace for melting nickel-containing raw materials / Y.V. Sharikov, **Quiroz Cabascango V.E.** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1 (1753). – C. 012064. – DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012064

96. Solarin, S.A. The relationship between natural gas consumption and economic growth in OPEC members / S.A. Solarin, I. Ozturk // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – № 58. – P. 1348–1356. – DOI:10.1016/j.rser.2015.12.278

97. Solonenko, V.V. Thermodynamic justification of opportunity of using high-temperature combustion flanks for oxidation of melt impurities in aggregates of converter type. Report 2. Interaction of the flank with metal and slag in the converter bath / V.V.Solonenko, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, M.V.Temlyantsev, N.F. Yakushevich // Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2017. – № 10 (60). – P. 811–819. – DOI:10.17073/0368-0797-2017-10-811-819

98. Solonenko, V.V. Oxidation of molten impurities in converters by means of combustion flames: Thermodynamic principles. 1. Thermodynamic analysis of processes in natural-gas combustion / V.V. Solonenko, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, N.F. Yakushevich // Steel in Translation. – 2017. – № 7 (47). – P. 449–455. – DOI:10.3103/S0967091217070130

99. Solonenko, V.V. Oxidation of molten impurities in converters by means of combustion flames: Thermodynamic principles. 2. Interaction of flame with metal and slag in converter bath / V.V.

Solonenko, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, N.F. Yakushevich // Steel in Translation. – 2017. – № 10 (47). – P. 650–657. – DOI:10.3103/S0967091217100084

100. Stanković, S. Review of the past, present, and future of the hydrometallurgical production of nickel and cobalt from lateritic ores / S. Stanković, S. Stopić, M. Sokić, B. Marković, B. Friedrich // Metallurgical and Materials Engineering. – 2020. – № 2 (26). – P. 199–208. – DOI:10.30544/513

101. Sun, Y. Heat Recovery from High Temperature Slags: A Review of Chemical Methods / Y. Sun, Z. Zhang, L. Liu, X. Wang // Energies. – 2015. – № 3 (8). – P. 1917–1935. – DOI:10.3390/en8031917

102. Swinbourne, D. Understanding ferronickel smelting from laterites through computational thermodynamics modelling / D. Swinbourne // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2014. – № 3 (123). – P. 127–140. – DOI:10.1179/1743285514Y.0000000056

103. Taimoor, A.A. Virtualization of the process control laboratory using AVEVA PRO/II / A.A. Taimoor // Computer Applications in Engineering Education. – 2016. – № 6 (24). – P. 887–898. – DOI:10.1002/cae.21758

104. Tang, X. Ferronickel enrichment by fine particle reduction and magnetic separation from nickel laterite ore / X.Tang, R. Liu, L.Yao, Z. Ji, Y. Zhang, S. Li // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. – 2014. – № 10 (21). – P. 955–961. – DOI:10.1007/s12613-014-0995-5

105. Téreygeol, F. The reverberatory furnace for ore smelting: An experiment on a South American innovation / F. Téreygeol, P. Cruz, J.C.Méaudre // Journal of Archaeological Science: Reports. – 2020. – № 33. – P. 102580. – DOI:10.1016/j.jasrep.2020.102580

106. Tu, Y. Effects of furnace chamber shape on the MILD combustion of natural gas / Y. Tu, H. Liu, S. Chen, Z. Liu, H. Zhao, C. Zheng // Applied Thermal Engineering. – 2015. – № 76. – P. 64–75. – DOI:10.1016/j.applthermaleng.2014.11.007

107. Veshkini, A. A computational study of soot formation and flame structure of coflow laminar methane/air diffusion flames under microgravity and normal gravity / A. Veshkini, S.B. Dworkin // Combustion Theory and Modelling. – 2017. – № 5 (21). – P. 864–878. – DOI: 10.1080/13647830.2017.1308558

108. Voropanova, L.A. Extraction of copper, cobalt and nickel ions from aqueous solutions by extractant cyanex 272 / L.A. Voropanova, V.P. Pukhova // Journal of Mining Institute. – 2018. – № 5 (233). – P. 498. – DOI:10.31897/pmi.2018.5.498

109. Vusikhis, A.S. Metallization of siderite ore in reducing roasting / A.S. Vusikhis, L.I. Leont'ev, , D.Z. Kudinov, V.S. Gulyakov // Russian Metallurgy (Metally). – 2016. – № 5 (2016). – P. 404–408. – DOI:10.1134/S0036029516050153

110. Wang, Y. Reaction Mechanism and Kinetics of Boron Removal from Molten Silicon by CaO–SiO2–CaCl2 Slag Treatment / Y. Wang, K. Morita // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2015. – № 2 (1). – P. 126–133. – DOI:10.1007/s40831-015-0015-7

111. Woo, D.H. Thermodynamic modeling of the NiO–SiO2, MgO–NiO, CaO–NiO–SiO2, MgO–NiO–SiO2, CaO–MgO–NiO and CaO–MgO–NiO–SiO2 systems / D.H. Woo, H.G. Lee, I.H.Jung // Journal of the European Ceramic Society. – 2011. – № 1–2 (31). – P. 43–59. – DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2010.08.019

112. Xu, L. Degradation mechanisms of magnesia-chromite refractory bricks used in oxygen side-blown reducing furnace / L. Xu, M. Chen, N. Wang, S. Gao, Y. Wu // Ceramics International. – 2020. – № 11 (46). – P. 17315–17324. – DOI:10.1016/j.ceramint.2020.04.020

113. Yan, L. Application of an efficient exponential wide band model for the natural gas combustion simulation in a 300 kW BERL burner furnace / L. Yan, G. Yue, B. He // Applied Thermal Engineering. – 2016. – № 94. – P. 209–220. – DOI:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.109

114. Zevgolis, E. The reducibility of the Greek nickeliferous laterites: a review / E. Zevgolis, C. Zografidis, I. Halikia // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2010. – № 1 (119). – P. 9–17. – DOI:10.1179/174328509X431472

115. Zhang, J. Characteristics and Mechanism of Reduction and Smelting-Separation Process of Copper Slag / J. Zhang, Y. Qi, D. Yan, X. Cheng, P. He // Journal of Iron and Steel Research International. – 2015. – № 2 (22). – P. 121–127. – DOI:10.1016/S1006-706X(15)60019-X

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

№ 2020666633

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020666633

Программа контроля теплового баланса отражательной печи с учетом условий сжигания и состава природного газа

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)***

Авторы: ***Кирос Кабасканго Валерия Эстефания (EC), Бажин Владимир Юрьевич (RU)***

Заявка № **2020665700**
Дата поступления **03 декабря 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***11 декабря 2020 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

№ 2021616676

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021616676

Программа цифрового автоматизированного контроля тепловым режимом газовых отражательных печей при огневом рафинировании никеля

Правообладатель: ***федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)***

Авторы: ***Кирос Кабасканго Валерия Эстефания (EC), Бажин Владимир Юрьевич (RU), Николаев Михаил Юрьевич (RU)***

Заявка № **2021615658**
Дата поступления **20 апреля 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***26 апреля 2021 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев