

На правах рукописи

Кирос Кабасканго Валерия Эстефания

*Valeria ★
001202*

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВОГО
РЕЖИМА ГАЗОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ
ОГНЕВОМ РАФИНИРОВАНИИ НИКЕЛЯ**

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Душин Сергей Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра автоматики и процессов управления, профессор;

Ремизова Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится 22 июня 2022 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.03 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 22 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

Бодуэн
Анна Ярославовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

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 1300°C до 1600°C, 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 цели работы были поставлены и последовательно решены 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 состоянием 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.

Научная новизна работы:

- получены зависимости влияния химического состава природного газа на качество никеля при плавке в отражательных печах, которые указывают на повышение температуры плавки на 70-100°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.

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».

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.

На защиту выносятся следующие положения:

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.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций 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 «Нанозифика 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 по работе. 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 программ 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.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю, доценту, доктору технических наук, заведующему кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» Владимиру Юрьевичу Бажину и своему наставнику, декану по работе с иностранными учащимися, доценту, кандидату технических наук Юрию Васильевичу Лыкову.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы общая цель и задачи работы, а также научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе представлены технологические особенности работы газовой отражательной печи для огневого рафинирования никеля и условия эксплуатации, выполнен обзор огнеупорных материалов, используемых в футеровке отражательных печей. Проведен анализ кинетических особенностей и термодинамических процессов огневого рафинирования никеля. Описаны режимы эксплуатации, влияющие на температурный режим отражательных печей при огневом рафинировании никеля с учетом их изменения теплового состояния.

Во второй главе представлены методология исследования. Разработаны цифровая кинетическая и математическая модели рафинирования никеля. Выполнено моделирование на основе вычислительной гидродинамики (CFD) с помощью программы ANSYS 2019R3 в рамках цифровой трансформации производства никеля и его сплавов. Проведен анализ работы печи с целью повышения её эффективности при изменении следующих параметров: размер и расположение дымохода печи и при изменении условий подачи природного газа через горелки.

В третьей главе представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученных при проведении моделирования по определению влияния химического состава и свойств природного газа на тепловой КПД отражательной печи. Разработана методика расчета теплового состояния печи при различных технологических условиях с использованием компьютерной программы MATLAB R2019, которая помогает оператору АСУ оценить эффективность эксплуатации печи.

В четвертой главе представлена схема системы контроля и алгоритм управления газовыми горелками отражательных печей, а также описание систем автоматического контроля и регулирования работы печи на всех уровнях управления. Разработан способ цифрового автоматизированного контроля параметров отражательных печей при помощи программного комплекса UNITY XL Pro от компании Schneider Electric. Рассчитана экономическая эффективность предлагаемого технического решения.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты проведенного исследования.

Основные результаты отражены в следующих **защищаемых положениях**:

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.

Тепловой КПД (процент тепловой энергии), выделяемого пламенем газовой горелки, поглощаемый расплавом в печи при рафинировании никеля влияет на технологические состояние и

качество самого процесса. Обычно значения теплового КПД варьируются от 70% до 95%, что в целом определяет энергетическую эффективность работы печи. Тепловые потери в боковой футеровке и своде печи могут достигать 12,5-14,5%, помимо тех, которые связаны с неконтролируемыми потерями тепла в образующихся отходящих газах. Допустимые значения тепловых потерь должны быть не более 2,5%. Методика определения суммарных потерь основана на первом законе термодинамики с учетом режима энергосбережения. На рисунке 1 представлена схема расчетного контрольного объема ОП.

Уравнение баланса энергии для этого контрольного объема шихты и теплового состояния ОП, в этом случае, определяется по формуле 1:

$$Q_{cv} + \sum m_i h_i = \sum m_e h_e + \Delta U \quad (1)$$

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.

Общую теплопередачу печи рассчитывали по формуле 2:

$$Q_{cv} = Q_{\text{огнеупоры}} + Q_{\text{прогноз}} + Q_{\text{потери неучтенные}} \quad (2)$$

где $Q_{\text{прогноз}}$ – это прогнозируемые потери тепла, которые могут зависеть от конструкции и условий эксплуатации печи; $Q_{\text{потери неучтенные}}$ – 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 части горелок.

Тепловые потери определяется по формуле 3:

$$Q_{\text{огнеупоры}} = Q_{\text{боковая футеровка}} + Q_{\text{поверхность горелки}} + Q_{\text{водосбора}} + Q_{\text{свод}} \quad (3)$$

Потери тепла от стенок печи связаны с разной теплопроводностью элементов печи, и по закону теплопроводности Фурье для боковой футеровки печи определяется по формуле 4:

$$q_{\text{б.футеровка}} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (4)$$

где k – теплопроводность материала корпуса, (Вт/м·К); L – толщина плоскости, (м); A – площадь плоскости, (м²); 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 определяются по формуле 5:

$$q_{\text{свод}} = A \frac{T_1 - T_{\infty}}{L/k + 1/h_{\infty}} \quad (5)$$

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 6:

$$H_s = \sum_j n_j \left(\int_{T_0=298}^{T_{r,j}} C_{p,j} dT + \int_{T_{r,j}}^{T_{m,j}} C'_{p,j} dT + \int_{T_{m,j}}^{T_a} C''_{p,j} dT \right) \quad (6)$$

где n_j , $T_{r,j}$ и $T_{m,j}$ – количество молей, 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 7:

$$H_L = \sum_j n_j [L_{r,j} + L_{m,j}] \quad (7)$$

где $L_{r,j}$ и $L_{m,j}$ – переходная теплота, и теплота плавления компонента j соответственно.

Предлагаемый метод, учитывает анализ дымовых газов и температуры дымохода для расчета теплового КПД. В процедуре разработки электронных таблиц использовали стандартные графики избыточного воздуха и энтальпий компонентов дымовых газов в атмосфере печи для упрощения расчетов. Чтобы понять описанную процедуру рассчитывали параметры и показатели с учетом самой низкой теплотворной способности или теплоту сгорания природного газа, средней температуры воздуха, необходимой для горения в сочетании с рациональных расходом дымовых газов. При разработке

математической модели изменяли состав газов с учетом приемлемого значения теплового КПД печи. Данные и результаты расчетов, приведены в таблице 1.

Расчетная цифровая модель показана на рисунке 2, которая была разработана в программе AVEVA PRO/II. Для этой схемы использовалась модель реактора, 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. Результаты моделирования отображены на рисунках 3, 4 и 5. Для данного случая необходимо учитывать переменную, которая оказывает наибольшее влияние. В данном случае, это низшая теплотворная способность, поскольку она зависит от изменения состава природного газа.

Для адаптации общей математической модели к реальным условиям проведена разработка комбинированной модели горения CFD с соответствующей теплопередачей при помощи программы ANSYS 2019R3, с учетом влияния состава природного газа на термодинамику и эффективность работы печи. Работа двух регенерирующих горелок среднего давления с выхлопным каналом, расположенным на конце примыкающим к горелкам (Рисунок 6) зависит от величины импульса пламени, который направлен на выходной канал, поэтому, циркуляция газа принята незначительной. Для получения и обоснования адекватной модели был выбран природный газ трех различных составов, представленных в таблице 2. На рисунке 7 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 и тем эффективней нагрев расплава. На рисунке 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. На модели видно, что один из потоков пламени направлен к правой стороне печи, и взаимодействует с остальными газовыми потоками.

На основании адаптации динамической модели было разработано программное обеспечение на интерактивной платформе, при которой можно управлять процессом в визуальной среде (3 уровня телекоммуникации АСУ) и регистрировать результаты плавки при изменении КПД для БД. Разработанная программа (Рисунок 9) имеет три варианта построения графической зависимости: изменение КПД от температуры дымовых газов на их выходе печи, от температуры воздуха для горения и от общих тепловых потерь. На основе разработанной программы, получено свидетельство о государственной регистрации РФ, программы для ЭВМ №2020665700.

2. Снижение потерь никеля 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.

Для устойчивой работы отражательной печи с учетом режимов управления 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 10 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. Контрольные участки цифровых измерений для оперативного управления процессом огневого рафинирования никеля состоят из следующих подсистем:

1. Системы цифрового автоматического регулирования в участке газохода: регулирование соотношения расходов газ-воздух с управляющим воздействием на общий расход воздуха; температуры в реакционном пространстве печи с управляющим воздействием на общий расход газ; давления разрежения в газоходном тракте перед котлом-утилизатором с регулированием потока шибера и изменения состава природного газа.

2. Системы общего цифрового автоматического контроля печи (системный блок цифровой трансформации с блоком BigData) с выводом на панель управления процессом данных: контроля и регистрации текущей температуры, расхода и давления воздуха для сжигания газа; расхода и давления природного газа перед горелкой; температуры в различных точках подины печи; содержания CO, CO₂ и O₂ в отходящих газах; температуры воды, охлаждающей дымовой шибера; температуры и давления разрежения в газоходном тракте, после котла-утилизатора, а также, для системы аварийной безопасности и предупреждения, в случае превышения значений регулируемых параметров.

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 (Рисунок 11). 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. 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.

Контроль запуска горелки. Техническое решение 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. Управление запуском каждой горелки представлено на рисунке 12.

Алгоритм работы горелки. Количество тепловой энергии, уходящей через дымоход, зависит от количества избыточного воздуха и температуры газов на выходе. По этой причине,

исследование основано на анализе состава дымовых газов и их влиянии на температуру печи. Анализ математической модели указывает на то, что процентное содержание кислорода в дымовых газах при использовании природного газа должно составлять от 0,6 до 3%, а минимальное содержание избыточного воздуха для природного газа должно составлять от 3 до 15%.

Производительность печи может изменяться в зависимости от избытка воздуха и температуры дымовых газов. Снижение производительности на 1% может происходить из-за увеличения избытка кислорода на 2% и повышения температуры дымовых газов на 20-25°C. В данном случае, идеальный процесс горения должен 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.

Уравнение переноса турбулентности k (многофазное), для расчета распределения газовых потоков в среде ANSYS, определяется по формуле 8:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta \rho u k - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta \rho v k - \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) = \theta \rho \mu_t G_\mu - \theta \rho \varepsilon - S_{k,s} \quad (8)$$

где k – теплопроводность; φ – функция рассеяния; $\sigma_k = 1$; $G_\mu = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]^2$; $S_{k,s} = \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 \left[\frac{\partial}{\partial x} (g u_s k / \varphi^2) + \frac{\partial}{\partial y} (g v_s k / \varphi^2) \right] dr$; $\varphi(r) = 1 + 2r + 0,06r^2$.

Уравнение теплопереноса турбулентности ε для многофазного газового потока, определяется по формуле 9:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\theta \rho u \varepsilon - \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\theta \rho v \varepsilon - \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) = C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} G_\mu - C_2 \theta \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

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

В исследовании использовали показатель содержания оксида углерода СО в качестве индикатора. Количество СО в дымовых газах, в первую очередь, указывает на потери из-за неполного сгорания, и уравнивает эффекты тепловых потерь из-за избытка воздуха.

Принимая во внимание нормативные экологические ограничения, наложенные на СО, установили концентрацию СО ниже этих пределов и близкую к оптимальному диапазону рабочих характеристик печи. Для природного газа он составляет 50-60 ppm. Таким образом, СО - очень чувствительный индикатор для неотрегулированной горелки. Если его концентрация повышается до 1000 ppm, это является надежным признаком небезопасных условий работы. С учетом принятых условий был разработан алгоритм, учитывающий характеристики дымовых газов и состав природного газа, который представлен на рисунке 13. Программное обеспечение разработано в среде UNITY XL Pro от компании Schneider Electric, при помощи которой можно программировать процесс в визуальной среде для уровня телекоммуникации АСУ.

Программное обеспечение состоит из следующих продуктов (Рисунок 14): 1) блока питания BMXCPS3500; 2) универсального контроллера Modicon M580 ePAC (первый программируемый контроллер автоматизации); 3) цифрового модуля дискретного ввода BMXDDI 1602, с 16-и дискретными входами; 4) модуля цифрового дискретного вывода BMXDRA0804, с 8-ю дискретными входами; 5) цифрового модуля аналоговых входов BMXAMI0810H, с 8-ю аналоговыми входами; 6) цифрового модуля аналогового вывода BMXAMO0802. На основе разработанной программы, реализованной в программном комплексе UNITY XL Pro, получено свидетельство о государственной регистрации РФ программы для ЭВМ №2021616676. Предлагаемые технические решения повышают экономическую эффективность печей и самого процесса огневого рафинирования, за счет снижения потерь при рациональном использовании компонентов природного газа. Экономия составляет 4,25 евро на каждые 100 евро при покупке природного газа.

Диссертационная работа выполнена на кафедре АТПП и в Центре Цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета, работа относится к направлению «Энергосберегающие технологии».

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Влияние состава природного газа на тепловой коэффициент полезного действия отражательной печи для никелевых сплавов / **В.Э. Кирос Кабасканго** // Научный журнал Вестник иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. № 5. – С. 1159–1167. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-5-1159-1167
2. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Управление параметрами газовых горелок отражательных печей горения при плавлении никельсодержащего сырья / **В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин** // Научный журнал Вестник иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 220–230. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-220-230

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. **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. – №1. – С.85–93. DOI:10.52351/00260827_2022_01_85
4. **Quiroz Cabascango, V.E.** Mathematical modeling of mass, heat and fluid flow in a reverberatory furnace for melting nickel-containing raw materials / **V.E. Quiroz Cabascango, Y.V. Sharikov** // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1753. – № 012064. DOI:10.1088/1742-6596/1753/1/012064
5. **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. – Vol. 1728. – №. 012019. DOI:10.1088/1742-6596/1728/1/012019
6. **Quiroz Cabascango, V.E.** Nickel oxide reduction in CO/CO₂ gas mixtures in reverberatory furnaces / **V.E. Quiroz Cabascango, V.Yu. Bazhin** // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol 1515. – №. 022028. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/2/022028

Публикации в прочих изданиях:

7. **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.
8. **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.
9. **Quiroz Cabascango, V.E.** Mathematical heat balance calculations for reverberatory furnace during the melting of nickel alloys / **V.E. Quiroz Cabascango, V.Yu. Bazhin** // Scientific Conference Abstracts of XVI

International Forum-contest of students and young researches Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – 2020. № 1. – С. 261–262.

10. **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». – 2020. – С.192–194.

11. **Кирос Кабасканго, В.Э.** Моделирование газовых потоков горелок отражательных печей с низким уровнем выбросов NO₂ в производстве никелевых сплавов / **В.Э. Кирос Кабасканго, В.Ю. Бажин** // Сборник научных трудов по итогам Международной Семинара «Нанозифика и Наноматериалы 2020». – Санкт Петербург, 2020. – С.157–162.

12. **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. – Т 4. – С. 74–77.

Свидетельства:

13. 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.

14. 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.

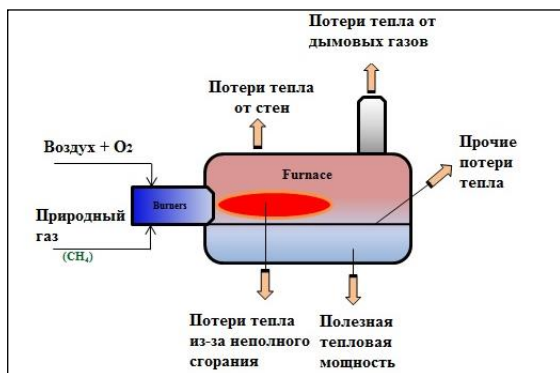


Рисунок 1 – Схема расчетного контрольного объема для отражательной печи при огневом рафинировании никеля

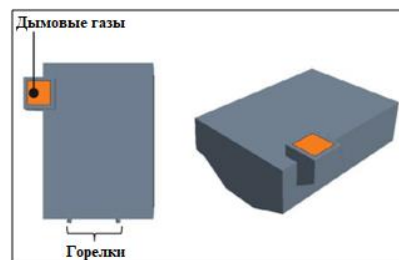


Рисунок 6 - Отражательная печь для никелевых сплавов

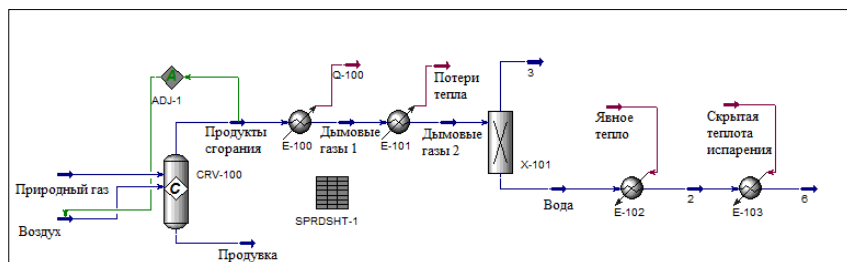


Рисунок 2 – Расчетная цифровая модель процесса горения ОП рафинировании никеля

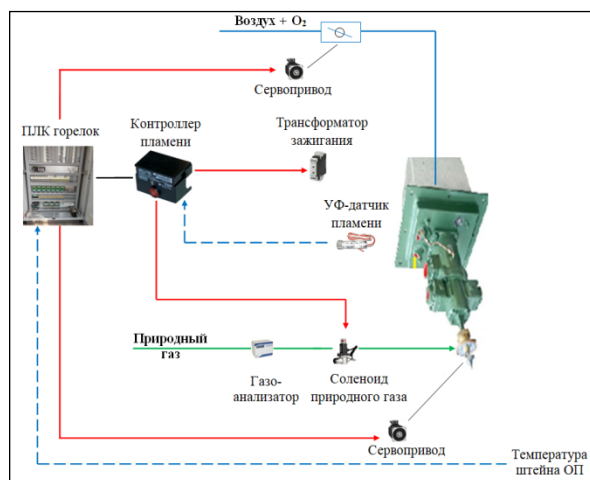


Рисунок 12 – Контроль запуска для каждой горелки

Таблица 1 – 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
Моноксид 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

Таблица 2 - Различные составы природного газа

Компоненты природного газа	Образец 1 Gazprom, Нижний Новгород № В-06-20-ГП, Россия (%)	Образец 2 Natural Gas Fenosa, Испания (%)	Образец 3 с. Natural Gas, Боливия (%)
Метан (CH ₄)	95,89	89,67	85
Этан (C ₂ H ₆)	2,48	2,14	6,12
Пропан (C ₃ H ₈)	0,057	0,7	3,75
Бутан (C ₄ H ₁₀)	0,167	0,5	1,06
Пентан (C ₅ H ₁₂)	0,0242	0,05	0,66
Гексан (C ₆ H 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

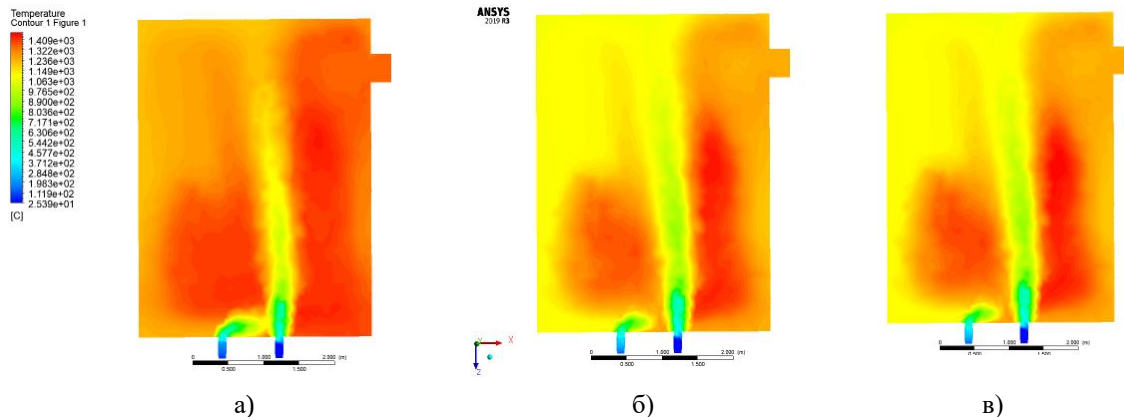


Рисунок 7 – Изменение температурного поля от пламени к штейне металл-никель:
а) количество CH_4 - 95,89%, б) количество CH_4 - 89,67% и в) количество CH_4 - 85%

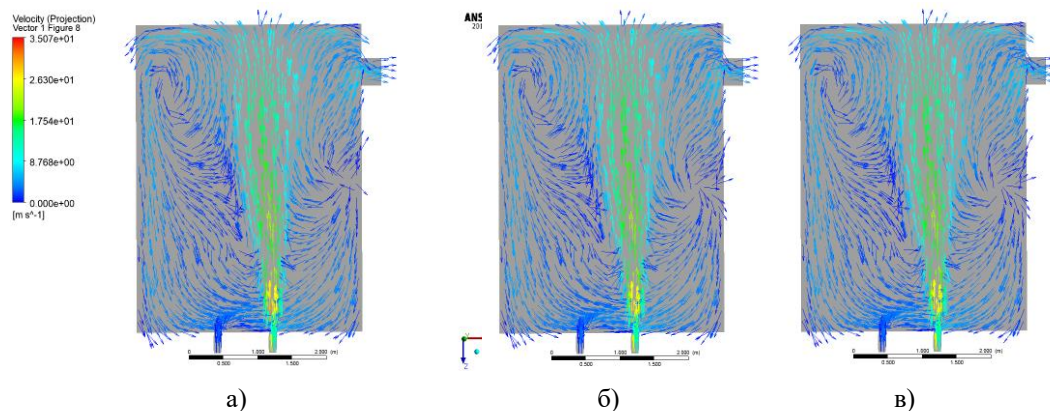


Рисунок 8 – Изменение скорости потока для различных составов природного газа:
а) количество CH_4 - 95,89%, б) количество CH_4 - 89,67% и в) количество CH_4 - 85%

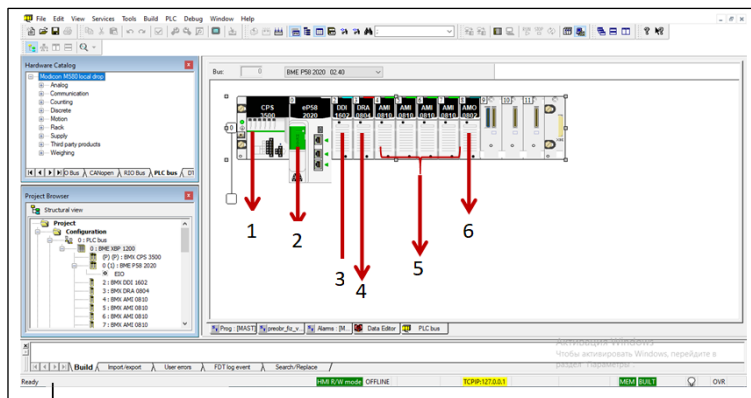


Рисунок 14 – Программное обеспечение компании Schneider Electric для газовых горелок ОП

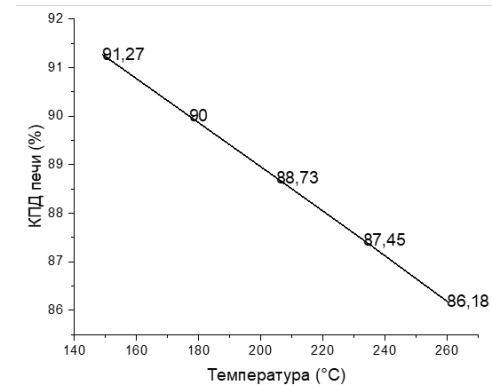


Рисунок 3 – Изменение КПД в зависимости от температуры
отходящих дымовых газов

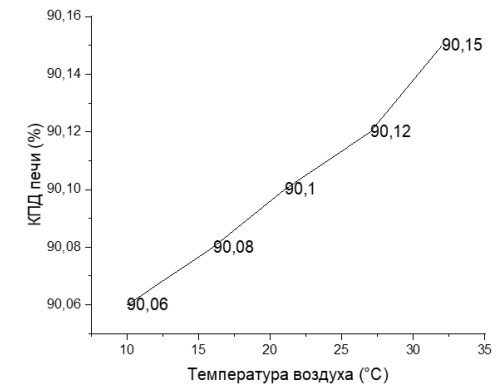


Рисунок 4 – Изменение КПД в зависимости от температуры воздуха
необходимого для горения

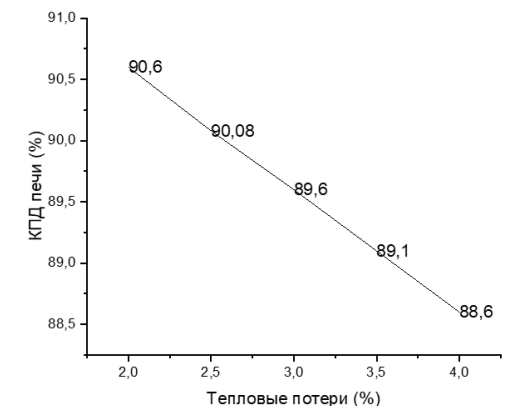


Рисунок 5 – Изменение КПД в зависимости от общих тепловых потерь

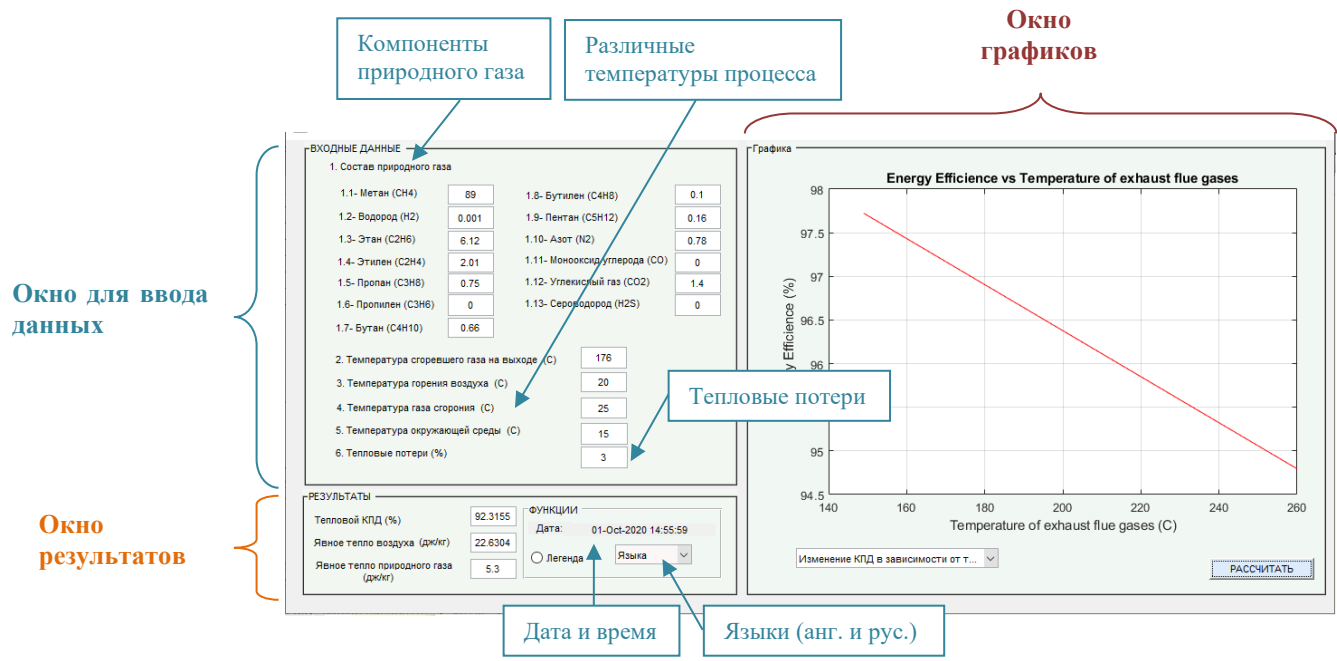


Рисунок 9 – Программа обработки данных в Guide/Matlab для экспериментальной модели

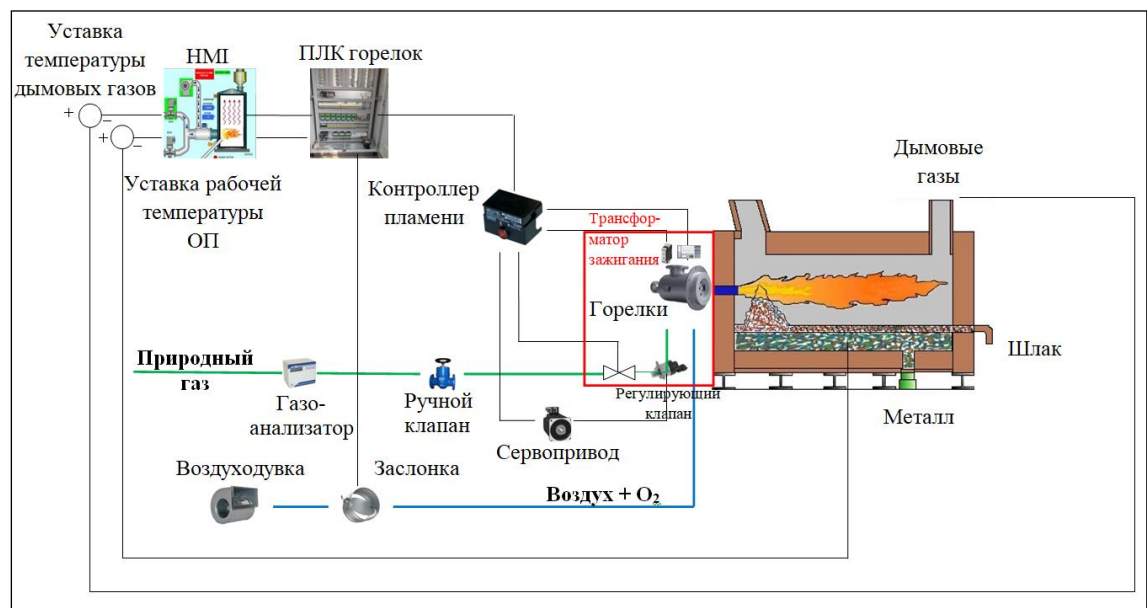


Рисунок 11 – Блок-схема управления газовой горелкой среднего давления печи ОП

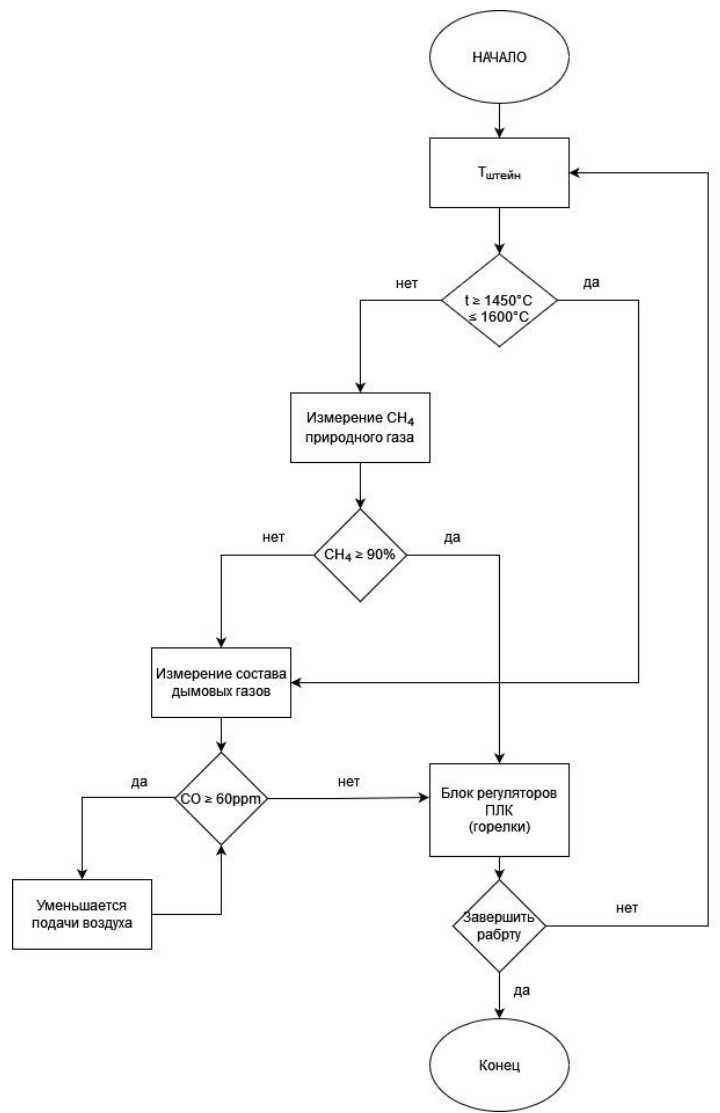


Рисунок 13 – Алгоритм работы программы управления горелкой

