

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

На правах рукописи

Николаев Александр Николаевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕРАБОТКИ НИКЕЛЕВЫХ
КОНЦЕНТРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ АНАЛИЗА**

*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, профессор
Шариков Юрий Васильевич**

Санкт-Петербург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ	10
1.1 Основные методы статистической обработки производственных данных	10
1.1.1 Статистические методы анализа в производственном процессе	10
1.1.2 Факторный анализ.....	11
1.1.3 Корреляционный и регрессионный анализ	15
1.1.4 Полный факторный эксперимент	23
1.2 Программный продукт RTD.....	29
1.3 GE Proficy CSense	31
ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ МЕДНО- НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ	39
2.1 Общее описание процесса сгущения медно-никелевого концентрата	39
2.2 Моделирование процесса сгущения медно-никелевого концентрата.....	50
2.2.1 GE Proficy Troubleshooter	52
2.2.2 Обработка в программном пакете RTD.....	67
2.2.3 MATLAB	78
2.3 Разработка системы автоматизации	83
2.3.1 Разработка системы автоматизации в среде MatLab (Simulink)	83
2.3.2 Реализация системы автоматизации в производственном процессе	98
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛОТНОСТИ СГУЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШТАБА СОТРУДНИКОВ	104

3.1	Разработка программного продукта по стабилизации плотности передела сгущения медно-никелевого концентрата	104
3.2	Тренажер для симуляции работы сгустителя	111
ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ		117
4.1	Процесс обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя.....	117
4.2	Моделирование процесса обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя.....	123
4.3	Разработка системы автоматизации, на основе модели полученной в Proficy Troubleshooter.....	129
ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА В ПЕЧИ ВЗВЕШЕННОЙ ПЛАВКИ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ		142
5.1	Процесс взвешенной плавки никелевого концентрата.....	142
5.2	Моделирование процесса взвешенной плавки никелевого концентрата .	151
5.3	Разработка системы автоматизации процесса плавки никелевого концентрата.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		178
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....		189
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		190
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....		191
ПРИЛОЖЕНИЕ Г		192
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....		193

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время существует ряд предложений и методов, позволяющих повышать качество процессов переработки никелевых концентратов, а также увеличивать экономический эффект производственных предприятий.

Для разработки данных методов и для обоснования своих выводов по тем или иным процессам в объекте разработчикам необходимо его моделирование. Часто созданные модели не имеют требуемой степени адекватности, это связано с наличием малоизученных взаимосвязей переменных объекта.

Многосложные и распределенные системы подвергаются неконтролируемым возмущениям, такие возмущения остаются индивидуальными для каждого объекта, а значит не могут быть обобщены с помощью динамических моделей. В таких случаях появляется необходимость создания модели, основанной на правилах нечеткой логики и обработанных статистических данных, полученных на функционирующих объектах.

Математическая модель такого типа позволяет разработчику получить правильный отклик целевой величины при изменении управляющих воздействий. Модель, основанная на производственных данных и на знаниях инженера-технолога, практически полностью повторяет реальный объект, следовательно, получить разрешение на внедрение созданных на ее основе систем автоматизации становится значительно проще.

Архивные данные хранятся на всех основных производствах страны, но их обработка стандартными средствами статистического анализа ведет к значительным временным затратам, а также ошибкам, которые в дальнейшем влияют на полученную регрессионную модель. Решение задачи оптимизации процесса статистической обработки и повышение ее качества является актуальным в настоящее время, так как своевременная и правильная оценка протекания процесса позволит сократить материальные затраты на устранение возможных отклонений качественных показателей выходного продукта от нормы.

Исследование и статистическая обработка производились на примере следующих объектов: передел сгущения медно-никелевого концентрата; печь взвешенной плавки для никелевого концентрата; печь кипящего слоя для обжига никелевого концентрата.

Передел сгущения медно-никелевого концентрата, являющийся одним из объектов диссертационной работы, имеет значительную дестабилизацию плотности выходного концентрата, в связи с отсутствием системы автоматического регулирования управляющими воздействиями. Управление сгустителями происходит в ручном режиме и значительно осложняется возмущением по подаче реагента и сливу. Дестабилизированное значение плотности на разгрузке сгустителей ведет к высоким материальным затратам: низкая плотность снижает содержание твердого в пульпе и требует больших затрат на реагенты в дальнейших переделах; высокая плотность, в свою очередь, приводит к замедлению хода процесса и к увеличению нагрузки на электрооборудование, что обуславливает преждевременный износ и дополнительный расход электроэнергии (насосы на разгрузке).

Изучение процесса сгущения является одной из главных задач для многих специалистов, в разное время в этот раздел науки внесли свой вклад: Шпилева Л.В., Нураев Ю.О., Текиев В.М., Болотаева И.И., Растяпин В.А., Рутковский А.Л., Лайнер А.И. и др..

По второму объекту изучения проведен анализ процесса переработки никелевого концентрата на штейн в печах взвешенной плавки, который свидетельствуют о том, что существующие уравнения, описывающие связи и закономерности кинетики процесса имеют ряд недостатков, а существующие модели процесса носят обобщенный характер.

Третий объект диссертационной работы представляет собой процесс обжига сульфидного никелевого концентрата в печи кипящего слоя, анализ которого показывает наличие неизученных взаимосвязей переменных процесса, а также

возможностей по внедрению современных методов регулирования для стабилизации целевого параметра – температуры газов под сводом печи.

Вышеперечисленные минусы процессов переработки никелевого концентрата, а также отсутствие точных и удобных методов статистической обработки определяют актуальность, новизну и практическую значимость диссертационной работы.

Цель диссертационной работы. Повышение эффективности управления сложными металлургическими объектами за счет применения регулирования на основе статистических моделей и нечетких множеств.

Основные задачи исследования:

1. Выявление влияющих на процесс плавки никелевого концентрата факторов;
2. Анализ зависимости содержания никеля в концентрате от значения плотности выходного продукта передела сгущения;
3. Анализ влияния загрузки и разгрузки пульпы в сгуститель на выходную плотность сгущения медно-никелевого концентрата;
4. Создание программного продукта по оптимизации процесса сгущения медно-никелевого концентрата;
5. Разработка программного тренажера, имитирующего работу сгустителя, в нормальном и аварийном режимах;
6. Анализ влияния входных переменных печи кипящего слоя на качество получаемого огарка;
7. Разработка прогнозирующих систем управления для процессов переработки никелевых концентратов.

Методология и методы исследования. В работе были использованы статистические методы исследования производственных данных и обработка этих данных в программных продуктах GE Proficy CSense и RTD. Статистическая модель процесса сгущения медно-никелевого концентрата строится на основании передаточных функций, полученных из нескольких срезов данных. Каждый сгуститель в модели представляет собой разность двух наборов

последовательных передаточных функций. Реализация модели сгущения, а также автоматизированной системы управления проводилась в среде MATLAB (Simulink) и в программных продуктах GE Proficy Troubleshooter, GE Proficy Architect. Для создания программного продукта по стабилизации процесса сгущения использовался программный пакет Microsoft Visual Studio 2008.

Для моделирования процесса обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя, а также для синтеза автоматизированной системы управления, использовался программный продукт GE Proficy Troubleshooter и GE Proficy Architect.

Моделирование процесса переработки никелевого концентрата в печи взвешенной плавки проводилось в программных продуктах ReactOp и GE Proficy CSense.

Научная новизна работы:

1. Сформирован алгоритм стабилизации плотности суспензии, посредством управления разгрузкой и загрузкой сгустителей, с учетом действующих возмущений, таких как: неконтролируемый слив, подача реагентов;
2. Разработан алгоритм работы программного продукта по имитации работы сгустителя (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614355);
3. Установлена зависимость между расходом концентрата в печь кипящего слоя и температурой потока огарка из этой печи;
4. На основании установленной зависимости между расходом дутья в печь взвешенной плавки и содержанием сульфидов никеля в штейне предложено для управления процессом переработки никелевого концентрата использовать регулятор с прогнозирующей статистической моделью и набором правил нечеткой логики.

Основные защищаемые положения:

1. Автоматизированная система параллельного управления загрузкой и разгрузкой сгустителей позволяет уменьшить колебания плотности медно-никелевого концентрата передела сгущения до $0,05 \text{ т/м}^3$;
2. Для прогнозирования параметров расхода дутья при взвешенной плавке никелевого концентрата следует использовать регулятор, основанный на статистической модели и дополненный экспертными правилами нечеткой логики;
3. Использование статистического программного комплекса Proficy CSense в качестве регулятора с прогнозирующей моделью позволяет стабилизировать температуру газов под сводом печи кипящего слоя для полного завершения реакций обжига тонких фракций никелевого концентрата и обеспечения температурного режима пылеулавливающего оборудования.

Практическая значимость работы:

1. Создан программный продукт, позволяющий стабилизировать процесс сгущения медно-никелевого концентрата;
2. Разработана система автоматизации процесса сгущения медно-никелевого концентрата;
3. Установлено влияние расхода концентрата в печь кипящего слоя на температуру огарка, подаваемого в трубчатую вращающуюся печь;
4. Выполнена разработка автоматизированной системы управления на основе регулятора с прогнозирующей моделью для процесса обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя;
5. Синтезирована система управления процессом плавки никелевого концентрата, основанная на правилах нечеткой логики и обработке статистических данных;
6. Разработана программа специализированного тренажера для имитации работы сгустителя в условиях действия реальных возмущений (получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614355).

Достоверность научных результатов. Результаты моделирования сопоставлены с архивными данными процессов сгущения медно-никелевого концентрата и переработки никелевых концентратов, и имеют высокий уровень сходимости с ними. Тестирование систем управления процессами также проходило на основе производственных данных.

Апробация работы:

1. Международная научная конференция «Проблемы недропользования», Горный Университет, Санкт-Петербург, 2016;
2. Ежегодная международная конференция во Фрайберге, Фрайбергская Горная Академия, Фрайберг, 2015;
3. На разработанный программный тренажер по работе сгустителя получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614355

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 5-ти печатных работах, в том числе в 3 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, получено 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит 193 страницы машинописного текста, 99 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 114 наименований.

ГЛАВА 1 МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

1.1 Основные методы статистической обработки производственных данных

1.1.1 Статистические методы анализа в производственном процессе

Совершенствование ведения процессов предприятия и совершенствование качества продукции предприятий является одной из важнейших и актуальных задач в нашей стране. Такое совершенствование требует от персонала значительных знаний процесса, а также огромных трудозатрат, ведь в данном случае необходим поиск причин отклонений и их дальнейшее устранение. Для того чтобы выполнить эти задачи, требуется обработка ситуаций, которые характеризуют эти самые отклонения и часто для этого используются статистические данные [15, 32, 87].

Обработка архивных данных позволяет выявить причины несоответствий ведения процесса, разработать мероприятия по их устранению.

Математическая статистика это раздел, занимающийся проблемами сбора, анализа и обработки результатов производственного процесса. В настоящее время существует множество методов статистического анализа, наиболее известные методы: факторный анализ, полный факторный эксперимент, корреляционный и регрессионный анализы и т.д. Помимо методов, в статистике присутствует и огромное количество программных инструментов, позволяющих значительно сократить трудозатраты человека.

Анализ качества производственного процесса является одним из главных практических приложений математической статистики [87, 99].

Стоит сказать, что роль статистических методов анализа в развитие систем управления постоянно возрастает, именно использование статистических методов даст возможность предприятиям нашей страны сделать качественный скачок по основным производственным показателям [15].

Управление качеством процесса возникло еще в конце XIX века, ведь любой производственный процесс является параметрическим, а его параметры имеют значительную изменчивость. В случае распределенных, параметрических процессов необходим был критерий качества, который позволил бы поставить изменение параметров в определенные рамки отклонений [32]. Ф. Тейлор предложил ввести интервалы верхний и нижний предел, значение параметра между этими границами стали называть – допуск.

В начале XX века ученые и производственные специалисты заинтересовались возможностью предсказания брака, появляющегося в ходе процесса, для этого они стали изучать не сам брак, как таковой, а ход процесса приведший к нему. Результатом таких исследований стало появления статистических методов анализа [45].

В данной главе мы рассмотрим основные методы статистической обработки.

1.1.2 Факторный анализ

Факторный анализ, как статистический метод, используется для обработки значительных объемов данных, основная цель которого – уменьшение числа переменных и определение их взаимосвязей [45, 91].

При этом стоит отметить, что факторный эксперимент проблематично применять в случаях, когда используются необработанные данные.

Основа факторного анализа – это корреляционные связи между переменными процесса [15, 91]. Факторный анализ проводится по матрицам интеркорреляции, представляющую собой квадратную таблицу следующего вида:

Таблица 1 – Матрица интеркорреляции

	X1	X2	X3
X1	1	0.3	0.7
X2	0.3	1	0.4
X3	0.7	0.4	1

Коэффициент корреляции (r) изменяется в пределах от 0 до 1, если $r = 0$, то параметры независимы, если $r = 0,2 - 0,4$ – корреляция является слабой, если $r = 0,5 - 0,7$ – корреляция является хорошей, если $r = 0,8 - 0,95$ – очень хорошая корреляция, $r = 1$ – детерминированная зависимость [45].

Как уже было сказано выше, одна из целей факторного анализа – это определение взаимосвязей переменных, однако существует и вторая цель – сокращение числа переменных процесса [45].

Фактор представляет собой некоторую скрытую переменную, которая объединяет в себе набор корреляционно зависимых параметров [91].

Факторный анализ решает следующие задачи [100]:

1. Количественное определение факторов, а также их относительности;
2. Определение признаков, обуславливающих действие какого либо из факторов, а также определение меры этого действия;
3. Определение влияния каждого фактора на признаки исследуемого объекта;
4. Создание облика объекта в факторном пространстве на основе рассчитанных факторов для каждого наблюдения.

Далее необходимо рассмотреть сущность факторного анализа. В процессе сгущения медно-никелевого концентрата измерены четыре параметра: П1, П2, П3, П4, все эти измерения обусловлены действием факторов: Ф1, Ф2. При этом, Ф1 имеет влияние на следующие три измеренных параметра (П1,П3,П5), а Ф2 имеет влияние на параметры (П2,П4,П6), а параметр П7 не обусловлен ни одним из факторов.

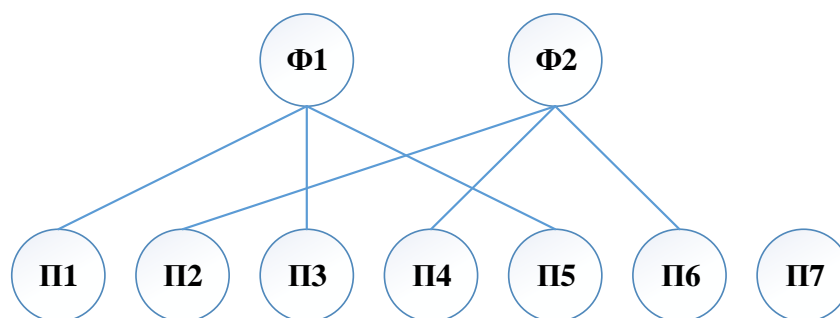


Рисунок 1 – Модель факторного анализа

Стоит отметить, что при первичной обработке производственных данных количество действующих факторов и их связь с параметрами процесса неизвестны. Для начала следует изучить интенсивность влияния Φ_1 и Φ_2 на все признаки и выбрать в наборе Π_j те параметры, которые обуславливают отдельно каждый из факторов.

Если предположить, что зависимость Π_j от Φ_m является линейной, тогда для нашего случая получаем следующее выражение:

$$\Pi_i = a_{i1} \cdot \Phi_1 + a_{i2} \cdot \Phi_2, \text{ где } i = 1, 2, 3, 4. \quad (1)$$

где a_{i1} , a_{i2} – факторные нагрузки.

Ниже представлена таблица парных корреляций (таблица 2) между этими параметрами:

Таблица 2 – Таблица парных корреляций между параметрами

	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7
П1	1	0,1	0,7	0,2	0,6	0,5	0
П2	0,1	1	0	0,8	0,5	0,9	0,2
П3	0,7	0	1	0	0,6	0,4	0
П4	0,2	0,8	0	1	0,3	0,9	0
П5	0,6	0,5	0,6	0,3	1	0,3	0,1
П6	0,5	0,9	0,4	0,9	0,3	1	0,1
П7	0	0,2	0	0	0,1	0,1	1

Приведенные выше коэффициенты корреляции представляют зависимость между параметрами. Как было определено выше, параметры описываются двумя факторам:

1. Φ_1 – П1, П3, П5;
2. Φ_2 – П2, П4, П6.

В таблице 3 приведен факторный анализ факторов Φ_1 и Φ_2 , при этом каждому фактору соответствует среднее значение r относящихся к этому фактору переменных [45].

Таблица 3 – Факторный анализ факторов Ф1 и Ф2

Параметр	Фактор 1	Фактор 2
П1	0,76	0,26
П2	0,2	0,9
П3	0,8	0,1
П4	0,2	0,9
П5	0,73	0,36
П6	0,4	0,93
П7	0	0,1

Из таблицы можно сделать вывод, что факторные нагрузки Ф1 и Ф2 имеют значительные отличия друг от друга. Например, факторная нагрузка Ф1 для параметра П1 показывает высокий коэффициент корреляции, а значит показывает высокую зависимость, при этом факторная нагрузка для Ф2 того же параметра имеет низкую зависимость.

После исследования таблицы 3 можно сделать вывод, что представленная выше матрица интеркорреляции определяется двумя факторами, которые не зависят друг от друга и при этом определяют параметры (П1-П6).

Стоит отметить, что коэффициент корреляции между переменными имеет еще одно свойство, его квадрат определяет общую часть дисперсии для двух параметров. Например, если корреляция между параметрами П2 и П6 составляет 0,9, то дисперсия $0,9^2 = 0,81$, это значит что 81 % дисперсия параметров совпадает.

В таблице 3 был проведен факторный анализ двух факторов, при этом факторная нагрузка также является коэффициентом корреляции между параметрами и влияющим фактором. Для определения степени общности обоих факторов параметром, необходимо рассчитать сумму квадратов факторных нагрузок – $0,76^2 + 0,26^2 = 0,65$, а значит дисперсия параметра П1 и двух факторов равна 65%, что является значительным перекрытием.

В случаях, когда дисперсия имеет низкое значение, можно говорить о том, что такой параметр определяется некоторым другим фактором, не указанным при анализе.

Из таблицы выше также можно найти и суммарную значимость факторов, для этого требуется возвести в квадрат все коэффициенты и суммировать их, в нашем случае Φ_1 имеет значимость равную 1,99, а значимость Φ_2 равна 2,7.

1.1.3 Корреляционный и регрессионный анализ

Любой производственный процесс на предприятии может быть описан в виде набора взаимосвязей его переменных, в случаях, когда анализ производится на основе статистических данных, можно говорить о корреляционном или регрессионном анализе [45, 91]. Анализ взаимосвязей преследует две основных цели, связаны ли Π_1 и Π_2 , и насколько тесно они связаны, если такая связь существует.

При статистическом исследовании какого либо объекта, рассматриваются три вида факторов: факторы, не учитывающиеся при исследовании; факторы, описывающие работу объекта; факторы, описывающие результат работы объекта.

Корреляционный анализ представляет собой метод обработки архивных данных, вследствие которого рассчитываются зависимости переменных процесса [91]. При этом стоит отметить, что нахождение корреляционной зависимости между параметрами не говорит об их функциональной связи, а лишь отражает зависимость линейного вида [45].

Для оценки корреляционной зависимости можно использовать два метода, визуальный и расчетный. При визуальном методе используется графическая зависимость одной переменной от другой и при получении некоторого корреляционного поля можно судить о зависимости в целом.

Коэффициент корреляции r является количественной оценкой тесноты связи, как говорилось выше, данный коэффициент может изменяться от -1 до +1. Если коэффициент равен 0, то связи не существует, если он колеблется между 0 и

1 или 0 и -1, то можно говорить о наличии связи, в первом случае связь положительная, во втором отрицательная [15].

В случаях с метрической шкалой и нормальным распределением переменных используется коэффициент корреляции Пирсона, он представляет собой отношение ковариации к произведению стандартных отклонений:

$$r = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

В случаях с дискретными случайными величинами:

$$K_{xy} = \sum_i \sum_j (x_i - m_x)(y_j - m_y) p_{ij}(x, y) \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_i \sum_j (x_i - m_x)^2_{ij}(x, y)} \quad (4)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_i \sum_j (y_i - m_y)^2_{ij}(x, y)} \quad (5)$$

В случаях с непрерывными случайными величинами:

$$K_{xy} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)(y - m_y) f(x, y) dx dy \quad (6)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f(x, y) dx dy} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (y - m_y)^2 f(x, y) dx dy} \quad (8)$$

В формулах представленных выше, m_x и m_y представляют собой математическое ожидание величин x и y , $p_{ij}(x, y)$ – вероятность того, что величины x и y примут значения x_i и y_j , $f(x, y)$ – является плотностью распределения.

Ниже представлены формулы получения дисперсий, где \bar{x} и \bar{y} – это средние значения, оценивающие математические ожидания:

$$D_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (9)$$

$$D_y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (10)$$

Корреляционные моменты рассчитываются по следующей формуле:

$$K_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (11)$$

Использование коэффициента корреляции имеет некоторые ограничения. Например, если существует нелинейная взаимосвязь между параметрами процесса, то она способна уменьшить величину коэффициента [15, 45].

Также значительно влияют на коэффициент корреляции так называемые «выбросы», если в наборе анализируемых данных существуют точки, явно находящиеся за пределами общего распределения, то их следует удалять.

Влияние третьей переменной может внести ошибку в определение взаимосвязи между переменными.

Помимо корреляционного анализа существует и регрессионный анализ. Как известно, любую взаимосвязь между двумя переменными можно описать в виде уравнения $y = f(x)$. Изменение функции y в зависимости от аргумента x называется регрессией, при этом регрессионный анализ использует средства, которые применяются для представления корреляционных связей. Уравнение вида $y = f(x)$ называется уравнением регрессии.

Существует два вида регрессии: линейная, нелинейная.

В настоящей диссертационной работе регрессионному анализу подвергался объект сгустителя медно-никелевого концентрата, а именно, производился поиск взаимосвязи между плотностью выходного продукта Y и двумя влияющими аргументами загрузкой X_1 , и разгрузкой X_2 . В результате такого анализа была получена диаграмма распределения, позволяющая сделать выводы о взаимосвязи данных параметров.

Взаимосвязь между плотностью и разгрузкой / загрузкой описываются уравнением вида: $\bar{y} = a + bx_1 + cx_2$, где y – это функция, a, b, c – численные параметры уравнения, x_1, x_2 – аргументы уравнения.

Часто, в регрессионном анализе учитываются не все аргументы, уравнение с одним аргументом выглядит следующим образом:

$$\bar{y} = a + bx \quad (12)$$

Данное уравнение является уравнением прямой, где b определяет наклон этой прямой относительно координат и называется – коэффициент регрессии.

Если переменная Y имеет корреляционную связь с переменной X , то коэффициент регрессии показывает насколько изменится величина первой переменной при изменении второй на единицу. Коэффициент определяется по следующей формуле [45, 91]:

$$b_{yx} = R_{xy} \frac{s_y}{s_x} \quad (13)$$

Также расчет коэффициента регрессии можно выполнять, не используя квадратичные отклонения s_y и s_x :

$$b_{yx} = R_{xy} \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (14)$$

$$b_{xy} = R_{xy} \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

В случаях, когда R_{xy} неизвестен, расчет выполняется по следующим формулам:

$$b_{yx} = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

$$b_{xy} = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum(y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

Стоит отметить, что коэффициент корреляции выражается через среднее геометрическое коэффициентов регрессии b_{yx} и b_{xy} [15]:

$$R_{xy} = \sqrt{b_{yx} b_{xy}} \quad (18)$$

Для определения параметров линейной регрессии используется метод наименьших квадратов. Данный метод основан на минимизации суммы квадратов отклонений функций от переменных, а именно $\sum(x_i - \bar{x})^2 = \min$.

Требование этой теоремы по отношению к $\bar{y} = a + bx$ удовлетворяет система нормальных уравнений:

$$an + b \sum x = \sum y \quad (19)$$

$$a \sum x + b \sum x^2 = \sum xy \quad (20)$$

Результаты, полученные в ходе решения уравнений 19 и 20, представлены ниже:

$$D = \begin{vmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{vmatrix} = n \sum x^2 - (\sum x)^2 \quad (21)$$

$$A = \begin{vmatrix} \sum y & \sum x \\ \sum xy & \sum x^2 \end{vmatrix} = \sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy \quad (22)$$

$$B = \begin{vmatrix} n & \sum y \\ \sum x & \sum xy \end{vmatrix} = n \sum xy - \sum x \sum y \quad (23)$$

Параметры a и b находятся по следующим формулам:

$$a_{yx} = \frac{A}{D} = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum yx}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (24)$$

$$a_{xy} = \frac{A}{D} = \frac{\sum x \sum y^2 - \sum yx \sum xy}{n \sum y^2 - (\sum y)^2} \quad (25)$$

$$b_{yx} = \frac{B}{D} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (26)$$

$$b_{xy} = \frac{A}{D} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum y^2 - (\sum y)^2} \quad (27)$$

На практике вместо формул 26 и 27 используются формулы:

$$b_{yx} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad (28)$$

$$b_{xy} = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum y^2 - n\bar{y}^2} \quad (29)$$

Для определения формы и тесноты корреляции между двумя переменными, используются, так называемые, эмпирические ряды регрессии. Их использование возможно в случаях, когда инженер имеет достаточно большое количество данных. Определение эмпирического ряда происходит за счет расчета средних

значений параметра \bar{y} по изменяющимся значениям параметра X , при этом оба параметра должны иметь корреляционную связь между собой [45, 48].

В графическом виде эмпирические ряды регрессии это точки, полученные из двойного ряда чисел, соединенные прямыми линиями. Такой график называется линиями регрессии.

Стоит отметить, что такие графики, как правило, показаны ломаными линиями, ведь помимо обоюдного влияния друг на друга, существуют третьи переменные и сторонние события. Для определения общей направленности связи необходимо выполнить выравнивание линий регрессии.

Существует несколько способов выравнивания: метод наименьших квадратов, скользящее среднее, графический способ [45, 48, 91].

Самый точный метод выравнивания рядов – это метод наименьших квадратов (далее МНК), основан он на предположении о минимальной сумме квадратов отклонений величины X от среднего значения этой величины.

Основное требования МНК – сумма квадратов отклонения переменной Y от значений рассчитанных точек Y' должна быть минимальной:

$$Q = \sum (y_i - \bar{y}'_x)^2 \quad (30)$$

Вычисляя этот минимум можно получить систему нормальных уравнений, где параметры уравнения являются неизвестными, а коэффициенты уравнения – известными.

Следующий способ выравнивания – графический. Используя этот метод, инженер строит из эмпирического ряда график в системе координат, далее намечаются средние точки регрессии, которые соединяются прямой линией. Очевидно, что при таком подходе точность определения достаточно низкая.

Способ скользящей средней состоит в том, чтобы последовательно рассчитывать среднее арифметическое между смежными членами ряда.

Помимо рядов регрессии существуют динамические ряды или как их еще называют временные. Особенность таких рядов состоит в том, что переменная X

является временем, т.е. зависимость между X и Y является односторонней, однако обрабатывать эти ряды можно теми же способами, что и ряды регрессии [46].

Анализ временного ряда начинается с того, что анализирующий должен построить график временного ряда на координатной плоскости, по оси абсцисс откладываются метки времени, по оси ординат – значения параметра. Если между временем и переменной существует линейная взаимосвязь, то для того, чтобы выровнять динамический ряд с помощью МНК необходимо использовать следующее выражение:

$$\bar{y}_x = \bar{y} + b_{yx}(x_i - \bar{x}) \quad (31)$$

При этом параметр линейной регрессии рассчитывается:

$$b_{yx} = \frac{\sum y(x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (32)$$

Числовые характеристики рядов динамики, позволяющие оценить скорость изменения величины, представляют собой геометрическую и арифметическую среднюю. Расчет геометрической средней производится по формуле представленной ниже:

$$lg \bar{x}_g = \frac{lg x_n - lg x_0}{n-1} \quad (33)$$

В случаях, когда требуется сравнить изменение двух переменных во времени, говорят о корреляции рядов динамики.

Помимо линейной регрессии, существует нелинейная регрессия. Например, часто, взаимосвязь между параметрами X и Y выражается в виде уравнения второго порядка:

$$y = a + bx + cx^2 \quad (34)$$

С помощью следующей системы нормальных уравнений можно отыскать параметры выражения 34:

$$an + b \sum x + c \sum x^2 = \sum y \quad (35)$$

$$a \sum x + b \sum x^2 + c \sum x^3 = \sum xy \quad (36)$$

$$a \sum x^2 + b \sum x^3 + c \sum x^4 = \sum yx^2 \quad (37)$$

Для оценки достоверности показателей регрессии используются выборочные показатели этой регрессии, при этом ошибка такого показателя рассчитывается по формуле представленной ниже:

$$S_{b_{yx}} = \sqrt{\frac{(1-R^2) \sum (y_i - \bar{y})^2}{(n-2) \sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (38)$$

$$S_{b_{xy}} = \sqrt{\frac{(1-R^2) \sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-2) \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (39)$$

Критерий Стьюдента определяет достоверность выборочного коэффициента регрессии, если $t_{\phi} \geq t_{st}$, то нулевая гипотеза отвергается.

Уравнения регрессии в эмпирическом виде также имеют ошибки, которые рассчитываются по следующим формулам:

$$S_{yx} = s_y \sqrt{1 - R_{xy}^2 \frac{n-1}{n-2}} \quad (40)$$

$$S_{xy} = s_x \sqrt{1 - R_{xy}^2 \frac{n-1}{n-2}} \quad (41)$$

где n – число степеней свободы.

Значения, полученные в формулах выше, являются остаточными СКО (средними квадратическими ошибками), такие ошибки показывают насколько отклоняются значения данных от линии регрессии.

Допустим, некоторые частные средние \bar{y}_x принадлежат линии регрессии, тогда их случайные изменения напрямую зависят от изменения переменной Y , а именно от S_{yx} , выборки n , разности между \bar{x} и x , для которого найдено значение \bar{y}_x . Квадратическая ошибка частной средней рассчитывается следующим образом [45, 91]:

$$S_{\bar{y}_x} = S_{yx} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{ns_x^2}} \quad (42)$$

При этом доверительный интервал представляется формулой 43:

$$\bar{y}_x \pm t S_{\bar{y}_x} \quad (43)$$

В данном выражении, t зависит от уровня значимости и числа степеней свободы.

Для того чтобы подобрать наиболее подходящее уравнение, которое бы описывало исследуемый процесс, применяют принцип дисперсионного анализа. Адекватность регрессионной модели можно определить следующим образом [13,40]:

$$D_R^2 = \sum (\bar{y}_{x_i} - \hat{y}_{x_i})^2 \quad (44)$$

где \bar{y}_{x_i} и \hat{y}_{x_i} представляют собой эмпирические и рассчитанные средние, соответственно.

Далее требуется найти дисперсию неадекватности модели, а именно:

$$S_R^2 = \frac{D_R^2}{a-m} \quad (45)$$

где a – число классовых интервалов, m – число параметров модели.

Для определения остаточной девиаты используется следующая формула:

$$D_e^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{f_x} (y_{ij} - \bar{y}_{x_i})^2 \quad (46)$$

Расчет остаточной дисперсии:

$$S_e^2 = \frac{D_e^w}{n-a} \quad (47)$$

Для того чтобы сравнить две дисперсии, используется критерий Фишера, который представляет собой отношение этих дисперсий, в случаях, когда критерий Фишера превышает табличное значение, модель определяется как неадекватная и выходит из дальнейшего использования.

Использование регрессионного анализа исследуемого процесса позволяет прогнозировать поведение объекта, если же, модель выходит за рамки данных, на основе которых она была получена, то использование ее не желательно.

1.1.4 Полный факторный эксперимент

Исследование объекта автоматизации, а также его моделирование, можно также проводить с помощью полного факторного эксперимента (ПФЭ).

Для исследования объекта посредством ПФЭ, выбирается один параметр, а также реализуются все сочетания влияющих факторов [56].

Изменение фактора определяется верхним и нижним уровнем, половина разности между ними является интервалом варьирования.

Так как для каждого фактора определяются два уровня, то ПФЭ представляет собой эксперимент типа 2^n .

Итогом всех расчетов проведенных в рамках ПФЭ, является уравнение множественной регрессии:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n b_{ik} x_i x_k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=i+1}^n \sum_{l=k+1}^n b_{ikl} x_i x_k x_l + \dots \quad (48)$$

В уравнение 48, b_0 – это свободный член, а b_i , b_{ik} , b_{ikl} – коэффициенты регрессии. Например, если $n = 3$, то выражение примет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (49)$$

Модель в виде уравнения 48 называется регрессионной моделью [45, 58]. На практике для расчета математической модели используют далеко не все взаимодействия, не больше третьего порядка, иначе расчеты становятся слишком громоздкими, что увеличивает риск появления ошибки.

Ниже представлена таблица, содержащая в себе зависимость количества взаимодействий для числа факторов.

Таблица 4 – Зависимость количества взаимодействий для числа факторов

n	N=2 ⁿ	Число линейных эффектов	Порядок взаимодействия					
			1	2	3	4	5	6
2	4	2	1	-	-	-	-	-
3	8	3	3	1	-	-	-	-
4	16	4	6	4	1	-	-	-
5	32	5	10	10	5	1	-	-
6	64	6	15	20	15	6	1	-
7	128	7	21	35	35	21	7	1

В ходе расчетов, факторы удобнее масштабировать или нормировать к границам «+1» – «-1», для этого [58]:

$$x_i = \frac{(\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0})}{I} \quad (50)$$

В формуле 50, x_i – нормированное значение, \tilde{x}_i – значение в инженерных величинах, \tilde{x}_{i0} – основной уровень, I – интервал варьирования, который равен модулю разницы \tilde{x}_i и \tilde{x}_{i0} .

Расчет в рамках ПФЭ начинается с составления матрицы планирования, в которой строки – это номера опытов, а столбцы – уровни факторов, как видно из формулы выше, значение уровня факторов, всегда равно либо «+1», либо «-1», поэтому для удобства в таблице можно указывать только знак уровня.

Ниже приведен пример таблицы для двух факторов:

Таблица 5. Матрица планирования ПФЭ типа 2^2

N	X1	X2	Y
1	-	-	Y1
2	+	-	Y2
3	-	+	Y3
4	+	+	Y4

Матрица, показанная в таблице 5, является базовой, на ее основе строятся матрицы следующих порядков. В геометрическом виде двухфакторный эксперимент представляет собой квадрат в плоскости (Рисунок 2) [45, 56]:

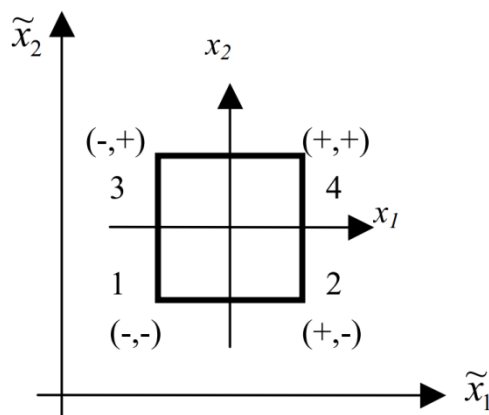


Рисунок 2 – ПФЭ 2^2 в геометрическом виде

На рисунке 2 нормированные координаты x_1 и x_2 пересекают основные уровни факторов, при интервале варьирования равном единице. В случаях, если $n = 3$, то в геометрическом виде ПФЭ будет показан в виде куба.

Влияние каждого фактора на целевой параметр зависит от уровня этого фактора, в случаях, когда исследователю неизвестно о реальной взаимосвязи действующих факторов, то строится развернутая таблица планирования, в которой учитываются взаимодействия всех факторов [56, 87, 91].

Матрица планирования эксперимента имеет ряд свойств [56]:

1. Симметричность:

Данное свойство подразумевает под собой симметричность в отношении экспериментального центра.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 0 \quad (51)$$

где N – число опытов, j – номер опыта, i – номер фактора.

2. Условие нормировки:

Согласно этому свойству сумма квадратов элементов каждого столбца равняется числу опытов N .

$$\sum_{j=1}^N |x_{ij}| = N \quad (52)$$

3. Ортогональность:

Свойство ортогональности звучит следующим образом, сумма почленных произведений любых двух вектор-столбцов матрицы равна 0.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{fj} = 0 \quad (53)$$

Данное свойство значительно упрощает производимые вычисления, а также дает оценки регрессионных коэффициентов. Ортогональность, в случаях, когда итоговая регрессионная модель неизвестна, дает возможность понять, какой из факторов имеет значение для целевого параметра, а какой – нет.

Если матрица планирования удовлетворяет условиям указанным выше, такая матрица является оптимальной [45].

При проведении эксперимента, для каждой i – той точки проводят определенное число опытов, после получения набора значений целевого параметра из него находят среднее.

Для того чтобы уменьшить влияние третьих факторов опыты проводятся в случайном порядке.

После проведения опыта, его необходимо проверить на воспроизводимость, опыт можно считать воспроизводимым, если дисперсия D_{yi} целевого параметра однородна в любой точке факторного пространства. Для этого требуется оценить дисперсию по следующей формуле [45, 56, 91]:

$$S_{yi}^2 = \frac{1}{(K-1)} \sum_{t=1}^K (y_{it} - \bar{y}_i)^2 \quad (54)$$

Далее с помощью критерия Кохрена проверяют гипотезу однородности дисперсий:

$$G_p = \frac{\max S_{yi}^2}{\sum_{i=1}^N S_{yi}^2} \quad (55)$$

Рассчитанное значение критерия Кохрена в дальнейшем сравнивают с его критическим значением, которое определяется по таблице, в зависимости от числа степеней свободы числителя, знаменателя и в зависимости от уровня значимости [45, 91]. В случаях, когда расчетное значение меньше критического, принято говорить об однородности дисперсий, в противном случае эксперимент требуется повторить.

Полученные коэффициенты регрессионной модели, также подвергаются оценке, расчет которой ведется по МНК. В данном случае минимизируется сумма квадратов между архивными данными и данными, полученными в ходе решения уравнения регрессии [45].

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i y_j \quad (56)$$

$$b_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_i x_k \bar{y}_j \quad (57)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_0 \bar{y}_j \quad (58)$$

После расчета оценок необходимо выполнить проверку значимости коэффициентов, чтобы убрать из расчетов коэффициенты, не влияющие на целевой параметр. Для проверки гипотезы о значимости коэффициента используют критерий Стьюдента:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S_b} \quad (59)$$

где S_b среднеквадратичное отклонение коэффициента.

В случаях, когда выполняется условие воспроизводимости опытов, оценки коэффициентов вычисляются с одинаковой погрешностью:

$$S_b = \frac{S_y}{N} \quad (60)$$

S_y в выражении 60 является оценкой дисперсии воспроизводимости эксперимента.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_{y_j}}{N} \quad (61)$$

Рассчитанное значение критерия Стьюдента также сравнивается с его критическим значением из таблицы, которое зависит от числа степеней свободы и уровня значимости. Если расчетное значение критерия меньше критического, то коэффициент считается значимым, иначе коэффициент приравнивается к нулю.

После получения регрессионной модели проводится проверка ее адекватности, для этого сравнивают дисперсию неадекватности и дисперсию неоднородности. Дисперсия неадекватности рассчитывается по следующей формуле:

$$S_a^2 = \frac{1}{(N-L)} \sum_{j=1}^N (y_{jp} - \bar{y}_j)^2 \quad (62)$$

В формуле 62, L – является числом значимых коэффициентов регрессионной модели, при этом нулевой коэффициент не учитывается.

Дисперсия неоднородности рассчитывается по формуле 63:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{y_j}^2 \quad (63)$$

Дисперсия неоднородности позволяет оценить погрешность наблюдений, а значит, может быть оценена только с помощью сравнения результатов параллельных опытов в каждой точке.

Проверка адекватности уравнения регрессии проводится с помощью критерия Фишера – F [45, 91]:

$$F_p = \frac{S_a^2}{S_y^2} \quad (64)$$

При решении данного выражения, числитель всегда должен быть больше знаменателя, в противном случае их меняют местами.

Расчетное значение критерия Фишера сравнивается с его критическим значением из таблицы, которое определяется по числу степеней свободы числителя и знаменателя, а также по уровню значимости. В случаях, когда расчетное значение превышает табличное, гипотеза об адекватности отклоняется.

В данной части диссертационной работы были рассмотрены основные методы статистической обработки архивных данных. Приведенные методы позволят инженерному составу проводить комплекс мероприятий, повышающих качество выходного продукта. С помощью аналитических методов можно не только проводить оценку, каких либо переменных процесса, но и выявлять причины возможных отклонений, а также прогнозировать работу объекта в дальнейшем. В настоящей диссертационной работе, помимо расчетов уравнений регрессии и активного эксперимента, использовались программные пакеты, работа которых основана на описанных выше методах.

1.2 Программный продукт RTD

В диссертационной работе рассматриваются процессы обжига и сгущения медно-никелевых концентратов. Обработка архивных данных этих процессов производится в современных программных пакетах. Одним из таких пакетов является продукт RTD, который был разработан в Санкт-Петербурге в 2004 году.

RTD расшифровывается как Residence Time Distribution (распределение времени пребывания) и предназначается для исследования гидродинамических потоков в химических аппаратах на основе метода стимул-реакции. Такая методика представляет собой введение некоторого числа меченых инертных частиц (трассеров) на входном потоке в аппарат и дальнейшее наблюдение отклика в выходящем потоке [112].

Далее полученная модель потока сопоставляется с экспериментальной кривой, подходящая модель имеет наименьшее отклонение рассчитанных значений от архивных данных и описывает поток в реакторе с наименьшим числом физических параметров [112].

Программа предоставляет следующие инструменты для работы с данными:

1. Первичная обработка экспериментальных данных;
2. Создание модели потока в реакторе с учетом его предварительно определенной структуры;
3. Оценка параметров модели потока;
4. Моделирование реакций системы на различные типы входных сигналов.
5. Создание определяемых пользователем шаблонов потока

RTD основан на Эксперте, заложенном в закрытый программный пакет, который помогает пользователю в изучении структуры гидродинамических потоков в реакторах [112]:

1. Эксперт помогает пользователю оценить параметры модели, ввода экспериментальных данных, а также создавать новые модели потоков и т.д.
2. Эксперт предоставляет пользователю последовательность процедур для лучшего понимания общей процедуры.

Первичная обработка данных:

1. Фильтрация (медиана, линейные и параболические фильтры);
2. Линеаризация;
3. Нормализация;
4. Поправка на фон;

5. Коррекция хвоста (по экспоненциальному закону);
6. Вырезка фрагмента соответствующей информации;
7. Оценки моментов нулевого, первого, второго и третьего порядка.

Для структурного моделирования предоставляются набор из стандартных реакторных блоков:

1. Реактор идеального перемешивания;
2. Реактор идеального перемешивания с байпасом;
3. Реактор идеального перемешивания с байпасом и «мертвой» зоной в серии (n – число реакторов);
4. Реактор идеального перемешивания в серии (n – число реакторов);
5. Реактор идеального перемешивания с «мертвой» зоной;
6. Реактор идеального перемешивания с байпасом и «мертвой» зоной;
7. Реактор идеального перемешивания в серии с обратным перемешиванием;
8. Реактор идеального вытеснения с обратным потоком;
9. Реактор идеального вытеснения.

Модель потока описывается посредством передаточной функции, при этом структуру потоковых моделей можно составлять из простых блоков в более сложные схемы. Функции передачи для модели генерируется автоматически [103].

После построения модели потока, производится ее экспертная оценка с помощью метода наименьших квадратов, о котором говорилось выше.

Описание работы программного продукта RTD приведено в главе 2.

1.3 GE Proficy CSense

Сознание человека способно хранить в себе информацию о внешнем мире и составлять какие-либо прогнозирующие суждения. Чем больше знаний он получает, тем легче дается ему принятие решений в той или иной жизненной ситуации. Если рассматривать жизнь человека с этой стороны, то параллельно ей можно провести описание сложной системы управления, которая основывается на

модели окружающей человека реальности, то есть о его представлении об этой реальности, чем больше информации, тем точнее модель, а значит и выше возможности прогнозирования различных ситуаций [113].

Разработчики современной техники стремятся к использованию аналогий человеческого интеллекта в своих продуктах, вследствие чего, программные пакеты становятся значительно более интеллектуальными, нежели раньше. Такой подход помогает разработчикам совместить быстродействие компьютера и возможности мозга человека и пользуется большим спросом в современной технологической индустрии. Например, использование систем обработки статистических данных, а также систем прогнозирования в управлении технологическими процессами в металлургии.

Схема построения систем управления имеет четкую горизонталь: цель – то, что требуется, средства – с помощью чего будет достигаться цель, результат – итоговый результат проведенных операций.

Однако в эту схему необходимо добавить еще один важный момент – это анализа результата по сравнению с целью [113].

В настоящий момент высокоточный интеллектуальный анализ данных является актуальным для разработчиков программного обеспечения, ведь невозможно оптимизировать какой-либо процесс без должного определения недостатков настоящего. Интеллектуальный подход в анализе данных помогает не только в построении разветвленных САУ, но и при моделировании процессов и при обработке этих данных для дальнейшего решения проблем управления.

В диссертационной работе помимо программного продукта RTD использовался пакет от компании GE – Proficy Troubleshooter или Proficy Csense. Данный инструмент позволяет на уровне АСУТП прогнозировать какие-либо нештатные ситуации и значительно улучшать реакцию системы на эти ситуации.

Также с помощью Proficy CSense у разработчиков появляется возможность оптимизировать процесс с минимальными трудозатратами. В Proficy CSense существует множество удобных инструментов, позволяющих подготовить

архивные данные к обработке и моделированию, позволяющих анализировать данные и определять взаимосвязи между параметрами процесса, что в дальнейшем значительно повышает адекватность и сходимость полученной математической модели. При этом построенные модели можно использовать в различных качествах, например как тренажер определенного процесса, как советчик оператора в реальном технологическом процессе, как систему мониторинга и т.д. Основные пользователи такого направления – это инженеры, операторы, технологи, руководители.

Proficy Troubleshooter представляет собой приложение, позволяющее провести обработку данных, выявить взаимодействия переменных процесса, построить модель процесса.

Моделирование в Proficy Csense происходит с помощью функциональных блоков, далее на основе работы этой модели воспроизводятся различные решения, которые в режиме реального времени интегрируются в существующую систему автоматического управления [113]. В основном, такие решения требуются для повышения качества производственного процесса.

Proficy Troubleshooter, на основе прогнозирующих моделей, формирует определенный набор нечетких правил, которые позволяют поддерживать ключевые параметры, либо действовать в режиме советчика оператора.

Для сокращения трудозатрат инженера АСУТП, а также во избежание ошибок, Proficy Troubleshooter имеет последовательный алгоритм действия обработки архивных данных. Этот алгоритм подразделяется на семь шагов [114]:

1. Первичная обработка и подготовка данных;
2. Визуализация данных (зависимости и взаимодействия параметров);
3. Моделирование;
4. Получение экспертных знаний и правил;
5. Оценка полученных результатов;
6. Объединение знаний;
7. Разработка решений по оптимизации.

Данный алгоритм выполнен в виде удобного интерфейса, который разработан и для дискретного и для непрерывного процесса.

Для обработки данных в Proficy Troubleshooter может использоваться множество различных источников: данные из Proficy Historian, данные из реляционных БД, данные из «.csv» файлов. Такой универсализм в подходе к виду архивных данных является очень удобным с точки зрения производственного объекта, которому не требуется использовать какой-то определенный тип хранения производственных данных.

Стоит отметить, что при использовании текстовых файлов «.csv» значительно труднее проводить оперативное обучение созданных моделей, а также появляется неудобство с физическим переносом модели на другой ПК.

Рисунок 3 показывает многообразие источников данных для обработки в Proficy Troubleshooter [113].

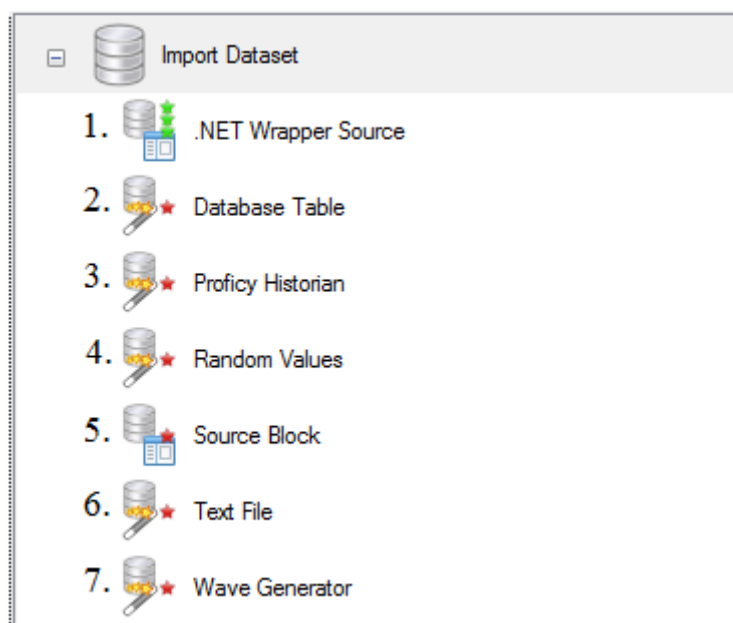


Рисунок 3 – Перечень вариантов импортирования данных
где 1- разработанные программистом алгоритмы в виде .NET приложений;
2- таблицы реляционной БД; 3- данные из Proficy Historian; 4-случайные
величины; 5- данные из OPC серверов; 6- текстовые файлы формата «.csv»; 7-
генераторы данных основанные на определенных законах.

Перед построением модели, Proficy Troubleshooter предоставляет возможность анализа архивных данных, существует определенный перечень инструментов, таких как корреляционные матрицы, тренды, гистограммы и т.д., которые позволяют анализировать зависимости между переменными процесса. При этом в программном пакете реализована возможность выбора только определенных участков набора данных, например, если требуется рассмотреть один из режимов работы сгустителя.

Первый этап обработки представляет собой определение взаимосвязанных переменных процесса, для этого используется инструмент – «Корреляционная матрица», который позволяет определить степень связи между всеми параметрами, что значительно облегчает поиск целевой функции и влияющих на нее параметров (управление, возмущение). Для определения этой взаимосвязи, Proficy Troubleshooter учитывает время запаздывания процесса, которое либо определяется автоматически, либо вводится вручную оператором.

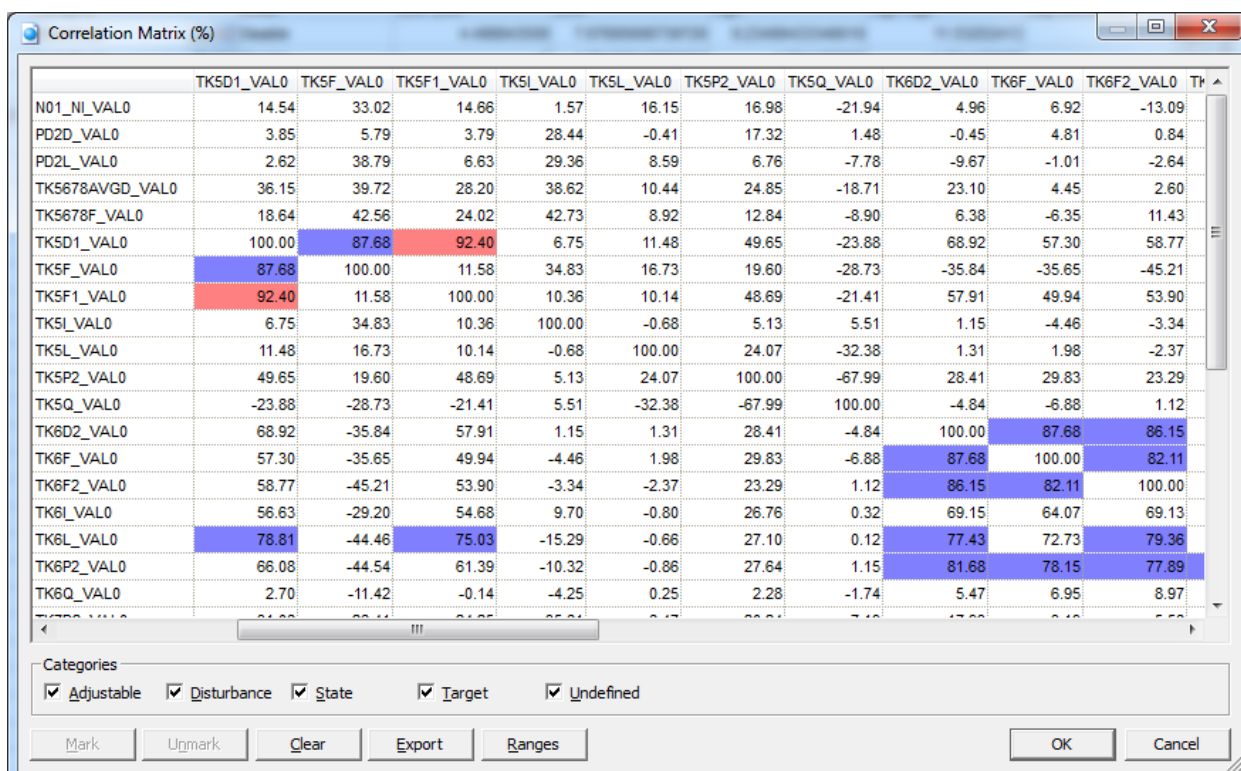


Рисунок 4 – Корреляционная матрица процесса сгущения

Для того чтобы Proficy Troubleshooter произвел построение модели, необходимо разделить архивные данные на несколько категорий. Во-первых,

требуется выбрать цель или ключевой параметр, который в дальнейшем будет оптимизироваться; во-вторых, требуется определить набор входных данных; в-третьих, требуется указать возмущения, действующие в ходе процесса. После этого Proficy Troubleshooter самостоятельно создает нелинейную математическую модель, и набор нечетких правил, в соответствии с которыми работает модель.

Создание модели может занять от одной до 10 минут в зависимости от количества данных, от их варьирования, а также от корреляционной зависимости целевой функции и остальных параметров процесса. Чем больше взаимосвязь и чем больше различных производственных ситуаций содержат данные, тем больше правил создает модель и тем больше времени требует Proficy Troubleshooter для ее создания.

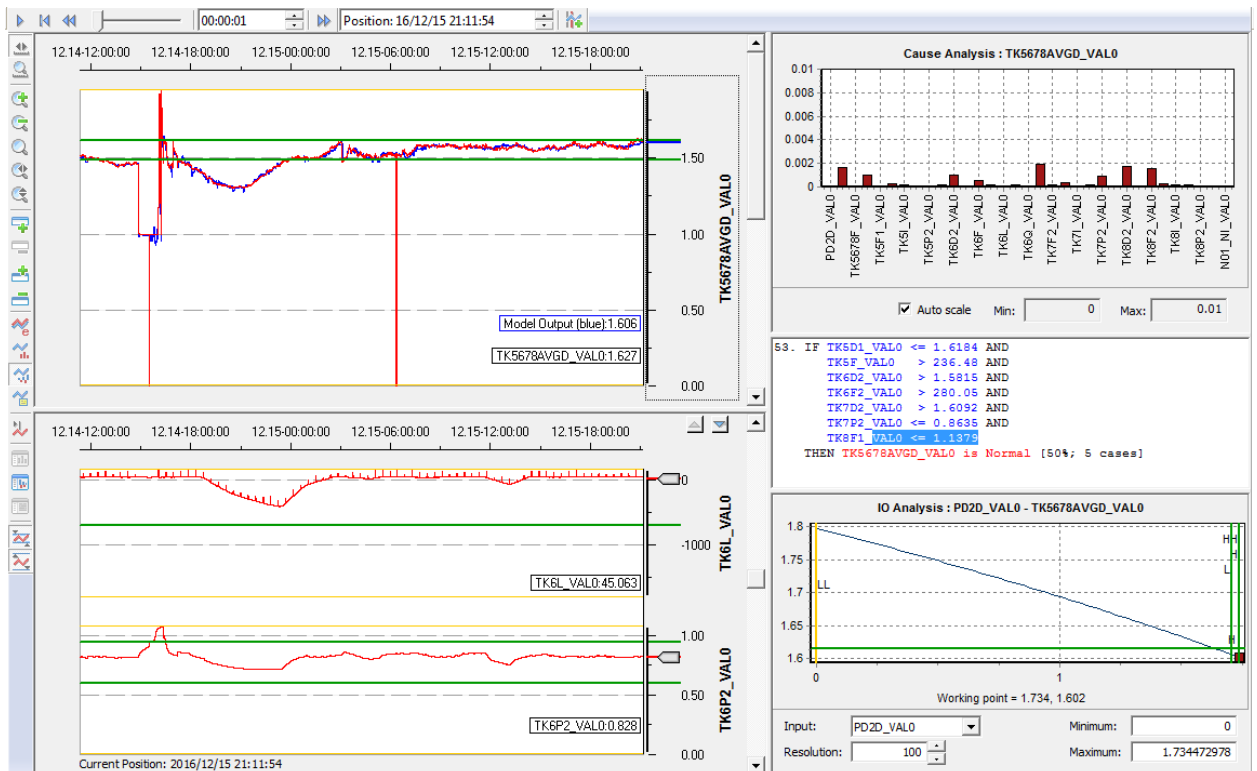


Рисунок 5 – Визуализация данных

После создания модели инженер может проверить ее натренированность и, если это требуется, ввести некоторые коррективы на первом этапе, затем перейти к визуализации данных и их извлечению (рисунок 5). С помощью этого инструмента анализирующий может оценить, как и в какой момент времени какой из входных параметров процесса влиял на ключевой параметр [114]. При этом

можно изменять значение такого параметра вручную и наблюдать за откликом целевого параметра (так называемый Target). Посредством данного инструмента проверяется адекватность работы модели.

После построения модели и после того, как она проверена на адекватность, инженер может провести оценку процесса и его оптимизации, а именно, указав диапазон распределения ключевого параметра и диапазон изменения входных переменных, получить возможное распределение этих переменных, позволяющее достигать оптимальной работы процесса.

На этапе объединения полученных знаний происходит уточненная настройка модели. Для осуществления этого этапа необходимо использовать знания экспертов технологов в области исследуемого процесса.

На последнем этапе происходит создание готовых решений, которые в дальнейшем могут быть использованы в виде тренажера, советчика оператора, системы управления, экспертной системы. Для этого, после обработки данных в пакете Proficy Troubleshooter, полученная модель экспортируется в программный компонент пакета Architect [114], где она отображается в виде функциональных блоков. В данном пакете существует возможность редактирования полученной модели, настройки связи со сторонним ПО, создания собственных блоков.

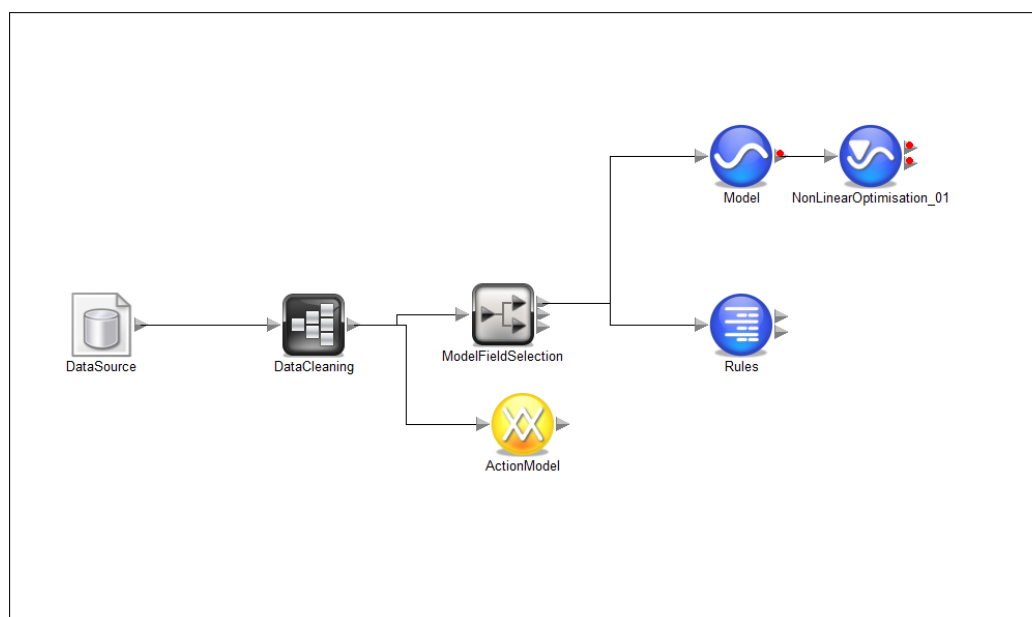


Рисунок 6 – Приложение Architect

После редактирования модели в пакете Architect такое решение можно использовать в уже реализованной АСУТП производства, например с помощью интегрирования в существующие SCADA системы посредством OPC технологии.

В заключение данной главы стоит отметить, что использование статистических методов анализа данных и дальнейшее использование их результатов, значительно повышают уровень качества производственного процесса. В настоящий момент разработка программных продуктов, улучшающих статистическую обработку, а также сокращающих трудозатраты на нее, является высоко актуальной задачей. В диссертационной работе использовались несколько аналитических программных инструментов последнего поколения, в частности Proficy Troubleshooter, который позволяет оценить производственный процесс, а также выполняет моделирование этого процесса и генерацию прогнозирующей системы управления. В ходе написания данной диссертационной работы была детально показана разработка системы управления на основе программного продукта от GE, а также доказана ее адекватность и проведено сравнение с ручными статистическими расчетами.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

2.1 Общее описание процесса сгущения медно-никелевого концентрата

В диссертационной работе были проведены исследования процессов переработки никелевых концентратов, рассмотрены способы их моделирования и автоматизированного управления. Одним из значимых возмущающих факторов данных процессов является непостоянство состава концентрата. В данном разделе рассмотрен процесс сгущения медно – никелевого концентрата, регулирование которого позволяет в дальнейшем получать стабильное содержание никеля в концентрате, идущем на переработку в печах взвешенной плавки.

Сгущение это процесс осаждения твердых частиц в пульпе под действием различных сил (тяжести, центробежной), в ходе которого образуется сгущенный продукт и удаляется осветленный слив [51, 66].

Процесс сгущения подразделяется на две операции:

1. Осветление, когда основная цель процесса получение чистого слива;
2. Сгущение, когда основная цель процесса получение сгущенного продукта с высоким содержанием твердого.

Стоит отметить, что довольно часто, операция сгущения преследует обе эти цели.

Основным назначением передела сгущения является повышение количества твердого в конечном продукте, а также максимально возможное выделение водной массы.

Суспензии, в которых происходит осаждение частиц, различаются по крупности этих частиц, это: коллоидные растворы, размер частиц не превышает 0,1 мкм, осаждение таких частиц возможно лишь с применением дополнительных реагентов; мутности, размер частиц которых колеблется между 0,1 и 0,5 мкм,

такие частицы также не осаждаются в обычных условиях; тонкие, с размером частиц от 0,5 до 100 мкм; грубые, с размером частиц больше 100 мкм. В диссертационной работе рассматривается сгущение медно-никелевого концентрата, размер сгущаемых частиц составляет в среднем 44 мкм.

Осаждение твердых частиц под действием силы тяжести происходит в аппаратах, представляющих собой большие чаны, в которые подается пульповое питание. При этом подача может быть как постоянной, так и периодической. После подачи, твердые частицы в пульпе начинают оседать, постепенно уплотняясь, и в дальнейшем выдаются из аппарата. Осветленный слой, находящийся в верхней части, переливается через борт аппарата [51].

Сгуститель, как аппарат для осаждения твердых частиц в установившемся режиме, можно разделить на пять зон (Рисунок 7) [66]:

1. Зона осветленного раствора;
2. Зона первоначального осаждения;
3. Промежуточная зона;
4. Зона сжатия;
5. Зона плотного осадка.

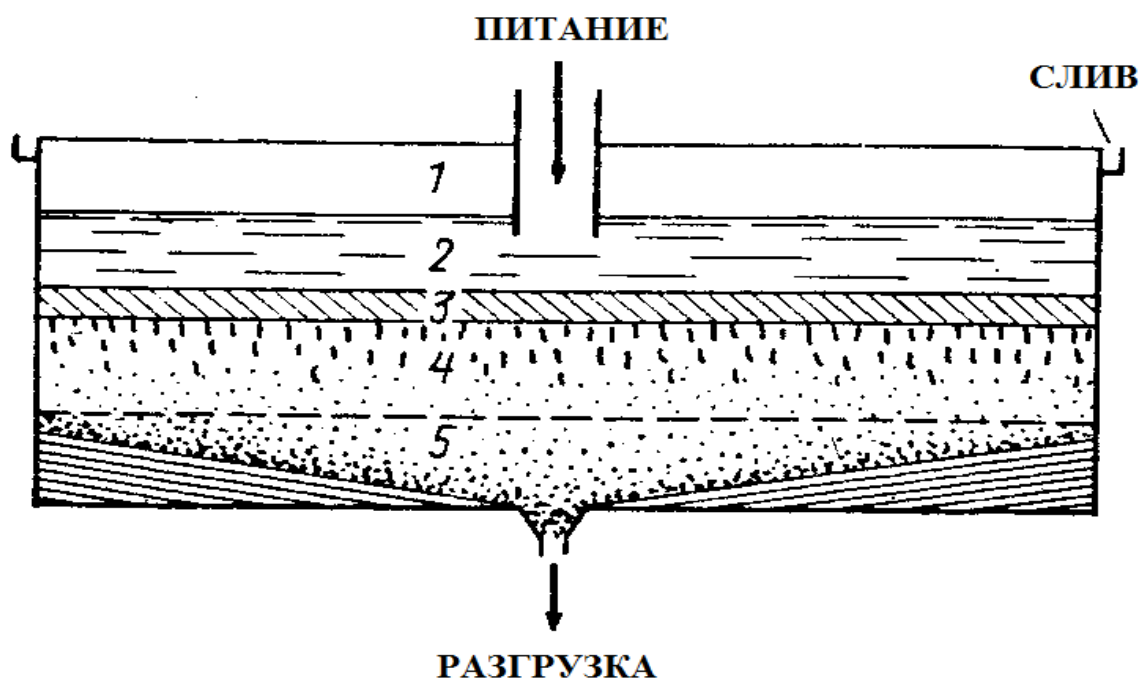


Рисунок 7 – Зоны сгущения медно-никелевого концентрата

В зоне осветленного раствора концентрация твердых частиц сравнительно небольшая и частицы осаждаются в свободном падении. При этом на частицу действуют следующие силы [66, 78]:

1. Сила тяжести (с учетом шарообразной формы частицы):

$$G_0 = \frac{\pi d^3}{8} (\delta - \Delta) \times g \quad (65)$$

2. Сила сопротивления среды частице (формула Стокса, размер $< 0,15$ мм):

$$P = 3\pi V_0 d \mu \quad (66)$$

По мере того как растет скорость частицы, растет и сила сопротивления, в какой то момент обе силы становятся равны друг другу и частица приобретает свою конечную скорость свободного падения [51].

Если говорят о ламинарном движении частиц, то конечная скорость свободного падения определяется следующей формулой:

$$V_0 = \frac{g(\delta - \Delta)d^2}{18\mu} \quad (67)$$

где V_0 – постоянная скорость осаждения, м/с; d – диаметр осаждаемой частицы, м; δ – плотность осаждаемой твердой частицы, кг/м³; Δ – плотность среды, кг/м³; μ – вязкость среды Па·с; g – ускорение свободного падения, м/с².

С ростом концентрации пульпы в следующих слоях сгустителя, скорость осаждения начинает уменьшаться, после достижения концентрацией некоторого порогового значения, частицы начинают осаждаться в условиях стесненного падения. Стесненное падение характеризуется тем, что изначально осаждаются более крупные частицы, скорость которых выше остальных, при этом их притормаживают более мелкие частицы с меньшей скоростью. Далее скорость частиц начинает уравниваться за счет, того, что более мелкие частицы после соударений с более крупными увеличивают свою скорость. В таких условиях частицы осаждаются единым слоем [78].

Очевидно, что скорость осаждения частиц при таком падении будет ниже на определенный коэффициент.

$$V_{ст} = kV_0 \quad (68)$$

Третья зона является промежуточной и представляет собой переход от стесненного падения к сжатому падению. В зоне сжатия, под давлением верхних слоев происходит восхождение воды снизу вверх, концентрация здесь максимальная, а скорость осаждения, в свою очередь является близкой нулю. Посредством гребков выполняется дополнительное воздействие на уплотненный слой, в соответствии с которым происходит еще большее уплотнение пульпы [51, 78].

Формула Стокса имеет определенные допущения, например, предполагается, что форма частиц шарообразная, а при свободном осаждении частицы не сталкиваются между собой, вследствие этого, стоит сказать, что определить точное значение скорости осаждения по такой формуле нельзя.

Сгущение медно-никелевых концентратов в реальных условиях предполагает постоянное взаимодействие частиц, ведь объемы аппарата ограничены, а содержание твердой фазы имеет высокое численное значение. Такое взаимодействие имеет высокое влияние на скорость осаждения, а вышеуказанный коэффициент для расчета скорости стесненного осаждения, в свою очередь, зависит от количества твердого, от гранулометрического состава и т.д. При расчете скорости осаждения, невозможно учесть эти влияния, а, следовательно, результаты такого расчета могут оказаться неправильными. Именно поэтому скорость осаждения твердой фазы в пульпе определяют посредством отстаивания пульпы в нескольких опытных цилиндрах [51, 66, 78].

Для определения скорости осаждения применяются цилиндры, в которые помещается проба пульпы и перемешивается. После окончания перемешивания необходимо считать время осаждения. Постепенно пространство цилиндра подразделяется на зоны, которые были упомянуты выше (зона осветленной жидкости – 1, зона свободного осаждения – 2, зона стесненного падения – 3, зона уплотнения – 4).

После начала эксперимента отмечают все четыре зоны, но с течением времени происходит значительное увеличение 1 и 4 зоны, тогда как 2 и 3 уменьшаются. В дальнейшем зоны 2 и 3 исчезают, а 1 и 4 соприкасаются, в этот момент скорость осаждения сильно снижается, и процесс останавливается (Рисунок 8). Если зона осадка не изменяется больше 2 – ух часов, то наблюдение прекращается.

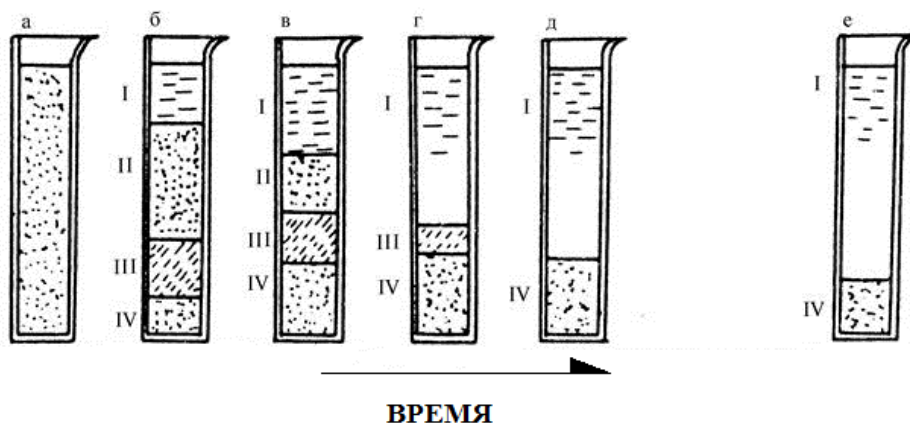


Рисунок 8 – Сгущение пробы пульпы в цилиндре

По истечении двух часов неизменяемой зоны осадка, наблюдения прекращаются, а эксперимент признается законченным, после этого полученные данные используются для построения кривой сгущения [51]. Ось абсцисс представляет собой время, а ось ординат – высоту осветлённого слоя (Рисунок 9).

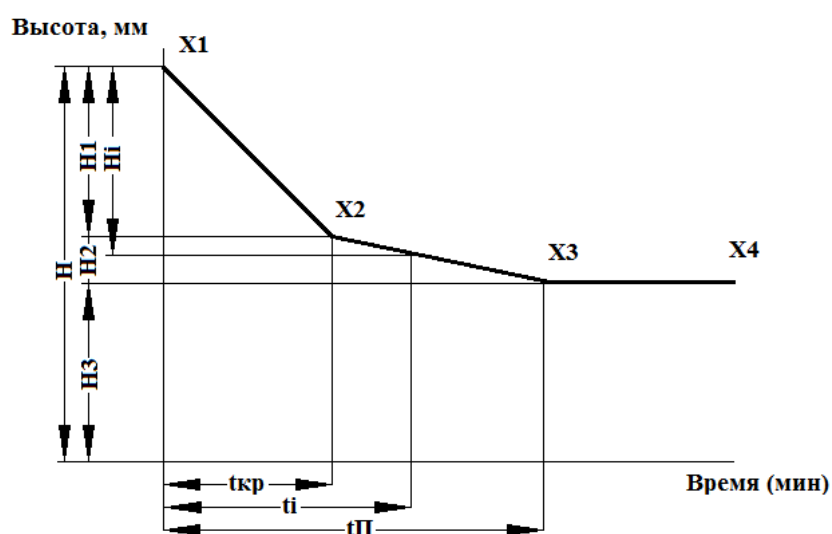


Рисунок 9 – Кривая процесса сгущения

На рисунке 9 изображена кривая процесса сгущения, где: H – высота пульпы, общая; H_1 – высота зоны свободного осаждения; H_2 – высота зоны уплотнения; H_3 – высота уплотненного осадка.

Как было сказано выше, по оси абсцисс отложено время, где: $t_{кр}$ – время до критической точки; $t_{П}$ – время полного осаждения.

Рисунок 9 также показывает, что на кривой сгущения отмечены три отрезка, первый – $X_1 - X_2$ – свободное осаждение частиц, второй – $X_2 - X_3$ – участок уплотнения осадка, третий – $X_3 - X_4$ – отрезок окончательного сжатия частиц. Момент перехода от свободного осаждения к уплотнению показан в точке X_2 – это критическая точка.

С помощью кривой процесса сгущения получаем значение оптимальной скорости [47, 66]:

$$V_0 = \frac{H_1}{t_{ср}} \quad (69)$$

Также можно рассчитать скорость осаждения в любой момент времени:

$$V_1 = \frac{H_1}{t_1} \quad (70)$$

Опыты в цилиндрах позволяют также рассчитывать объем осадка, после чего можно высчитать разжижение пульпы:

$$R_1 = \frac{V_1 \delta - Q}{Q \delta} \quad (71)$$

Предположив равенство разжижения в критической и конечной точках, можно найти удельную площадь сгущения (F , м³ч/т):

$$R_{кон} = R_{крит} = \frac{V_{крит} \delta - Q}{Q \delta} \quad (72)$$

$$F = \frac{R_{исх} - R_{кон}}{V_{крит}} \quad (73)$$

Удельная площадь представляет собой площадь, которая требуется для осаждения единицы массы твердого в единицу времени. Удельная площадь также

используется для подбора сгустителя при расчете общей площади осаждения $F_{общ}$ при известном значении производительности по продукту (Q , т/ч):

$$F_{общ} = QF \quad (74)$$

Помимо влияющих на процесс сгущения конструктивных особенностей аппаратов сгущения, процесс также подвергается влиянию: гранулометрического состава руды; температуры руды; наличия реагентов; содержания твердого в сгущенном продукте; содержания твердого в питании передела сгущения, форм частиц; вязкости; плотности [71]. Далее будут рассмотрены основные влияющие факторы.

Как было сказано выше, крупность частиц сгущаемой пульпы имеет значительное влияние на эффективность процесса, ведь чем больше частица, тем быстрее она осаждается. Но на практике пульпа состоит из частиц с разным размером, а значит, более мелкие частицы будут тормозить более крупные, чтобы этого не происходило, используются различные флокулянты [75].

Плотность твердой фазы пульпы также оказывает значительное влияние на скорость осаждения, чем она выше – тем быстрее осаждаются частицы [66].

Скорость осаждения также зависит от вязкости пульпы, чем меньше вязкость, тем выше скорость. Понижать вязкость можно посредством увеличения температуры пульпы до 20 – 30°C, при таком уровне температуры, происходит наиболее быстрое снижение вязкости.

Плотность пульпы, как влияющий на процесс сгущения фактор, является неоднозначным параметром. Как известно, плотность зависит от содержания твердого в пульпе, а значит, при сгущении высокоплотных пульп предприятие получает высокий выход по твердому, но при этом происходит сильно стесненное осаждение, что уменьшает скорость процесса и загрязняет слив твердыми частицами.

Напротив, в более жидких суспензиях, осаждение частиц происходит гораздо быстрее, нежели в плотных, но для обеспечения высокой производительности по твердому, необходимо загружать в сгуститель гораздо

большую массу пульпы, вследствие чего увеличится скорость потоков жидкости, восходящих вверх, а значит, увеличится и вынос тонких частиц в слив. Подбор плотности питания передела сгущения происходит опытным путем.

Как правило, содержание твердого в процессе сгущения не должно превышать семидесяти процентов, для того чтобы повысить процент содержания необходимо уменьшить разгрузку сгустителя, производительность по твердому при этом упадет. Если уменьшить плотность, увеличив разгрузку, то часть воды, содержащейся в пульпе, не будет удаляться.

Аппараты, используемые для сгущения и осветления, имеют следующую классификацию, в зависимости от их цели [51, 66]:

1. Сгустители и отстойники по принципу непрерывного действия, движущая сила процесса осаждения - сила тяжести. Такие аппараты, в зависимости от направления движения пульпы бывают: вертикальные, горизонтальные, радиальные (разновидность горизонтальных сгустителей), полочные.
2. Центробежные сгустители (осадительные центрифуги, гидроциклоны). В качестве движущей силы осаждения используется центробежная сила.
3. Шламовые бассейны, пруды. Данный вид отстойников, является отстойниками периодического действия, в таких аппаратах отсутствует гребное устройство, а удаление сгущенного продукта происходит самотеком. Основываясь на таком принципе работы, функционируют хвостохранилища обогатительных фабрик

Из всех представленных выше аппаратов, самый универсальный и часто используемый – это радиальный сгуститель, который применяется в гидрометаллургии и обогащении.

Радиальные сгустители подразделяются на сгустители с центральным приводом и на сгустители с периферическим, при этом первые также делятся на три типа: легкий, тяжелый и многоярусный [78].

Сгустители лёгкого типа имеют диаметр меньше 18 метров. На рисунке 10 представлен одноярусный радиальный сгуститель лёгкого типа с центральным

приводом. Он состоит из цилиндрического чана конического типа, в центр которого происходит разгрузка сгущенного продукта. Борт чана оборудован кольцевым сливным желобом. В центре чана находится загрузочное устройство для питания сгустителя. Привод центрального вала установлен на стальной балке, на которую также крепится механизм подъема гребков, собранных в рамном виде. Такая рама состоит из четырех граблин с гребками, с помощью которых осадок перемещается к центру аппарата [51].

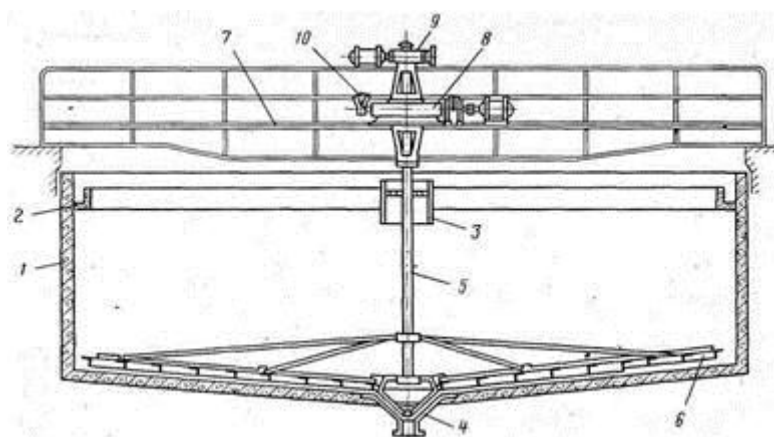


Рисунок 10 – Сгуститель радиальный легкого типа

где 1 – конический чан; 2 – сливной желоб; 3 – загрузочное устройство; 4 – разгрузочный конус; 5 – центральный вал; 6 – граблины; 7 – стальная балка; 8 – привод; 9 – механизм подъема рамы с граблинами; 10 – указатель перегрузки сгустителя

Указанный выше механизм подъема гребков имеет следующее значение, в момент перегрузки сгустителя по твердому, вал подвергается высокому крутящему моменту, одновременно происходит поднятие или спуск граблин (в среднем 400 мм).

Принцип действия сгустителя следующий: загрузка пульпы происходит по трубопроводу в загрузочную воронку, которая содержит в себе сетку, для грубой очистки пульпы и для уменьшения скорости подачи. При этом суспензия после подачи сначала движется вниз, а потом расходится от центра к сливному желобу, в этот момент времени происходит осаждение твердых частиц и осветление воды, которая самотеком отводится из сгустителя.

После осаждения на дно аппарата, сгущенный продукт посредством граблин перемещается к центру и разгрузке, откуда откачивается насосами. Для сгустителей больших размеров используются центробежные насосы, в случае со сгустителями небольшого размера можно использовать самотек или диафрагмовые насосы [78].

Помимо уплотнения частиц за счет силы тяжести, дополнительное уплотнение сообщают им граблины. Скорость движения привода граблин зависит от размера оседающих частиц, в случае с крупными частицами от 40 мкм скорость равна 0,15–0,2 м/с [71].

Радиальные сгустители тяжелого типа имеют диаметр больше 25 метров (максимально 100 метров). Чан сгустителя тяжелого типа состоит из железобетона. Большинство сгустителей такого типа имеют устройство подъема гребков.

Радиальные сгустители с периферическим приводом (Рисунок 11) имеют диаметр от 18 до 50 метров.

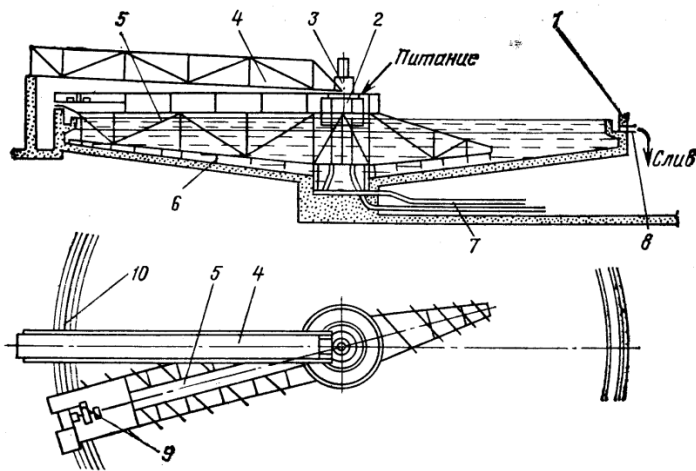


Рисунок 11 – Сгуститель с периферическим приводом

где 1 – железобетонный чан, 2 – головка опорная 3 – колонна, 4 – неподвижная колонна, 5 – подвижная колонна, 6 – граблины, 7 –разгрузка пульпы, 8 – сливной желоб, 10 – рельсовый путь, по которому движется граблина.

Как можно видеть из рисунка 11, на колонне в центре аппарата расположена вращающаяся головка, на которую опирается вращающаяся балка, при этом балка с другого конца опирается на рельс, уложенный по борту сгустителя.

Неподвижная балка с одной стороны упирается на головку, а с другой жестко прикреплена к основной конструкции чана. Через неподвижную балку происходит подача пульпы посредством прокладывания по ней трубопровода.

В настоящее время сгустители крупных размеров применяются значительно чаще других, это связано с наличием определенных плюсов, таких как: высокопрочная конструкция самого чана и гребковой фермы (высокая производительность по твердому), низкая высота расположения граблин, что исключает «мут» в верхнем слое сгустителя [51].

В процессе сгущения медно-никелевых концентратов используется три сгустителя с периферическим приводом, это сгустители №5, №6, №7, а также один сгуститель с центральным приводом - №8.

2.2 Моделирование процесса сгущения медно-никелевого концентрата

Для разработки системы автоматизации процесса сгущения, а также для проверки ее работы, требуется создание модели. Такая модель должна максимально соответствовать реальному объекту, а ее реакции на возмущение и управление должны соответствовать измеряемым переменным состояниям.

Для создания модели передела сгущения использовались производственные архивные данные, которые обрабатывались двумя путями в следующих программных пакетах: первый – GE Proficy CSense (GE Proficy Troubleshooter + GE Proficy Architect); второй – RTD + MATLAB.

На переделе сгущения медно-никелевого концентрата используются четыре параллельных радиальных сгустителя диаметром 50 метров (технологические позиции: №5, №6, №7, №8), сгустители №5, №6, №7 – имеют периферический привод граблин, сгуститель №8 имеет центральный привод граблин.

Питанием для операции служат хвосты медного цикла (основной флотации), при этом питание подается в пульподелительную коробку, откуда далее происходит распределение потоков на каждый сгуститель. Подача пульпы в пульподелительную коробку происходит с постоянной скоростью и не регулируется. Технологическая схема обогатительной фабрики представлена на рисунке 12.

Согласно этой схеме, после передела сгущения, концентрат плотностью ~ 1,5 т/м³ отправляется на коллективную флотацию, откуда сульфидный концентрат с содержанием никеля 9% отправляется на взвешенную плавку для получения штейна и шлака [67].

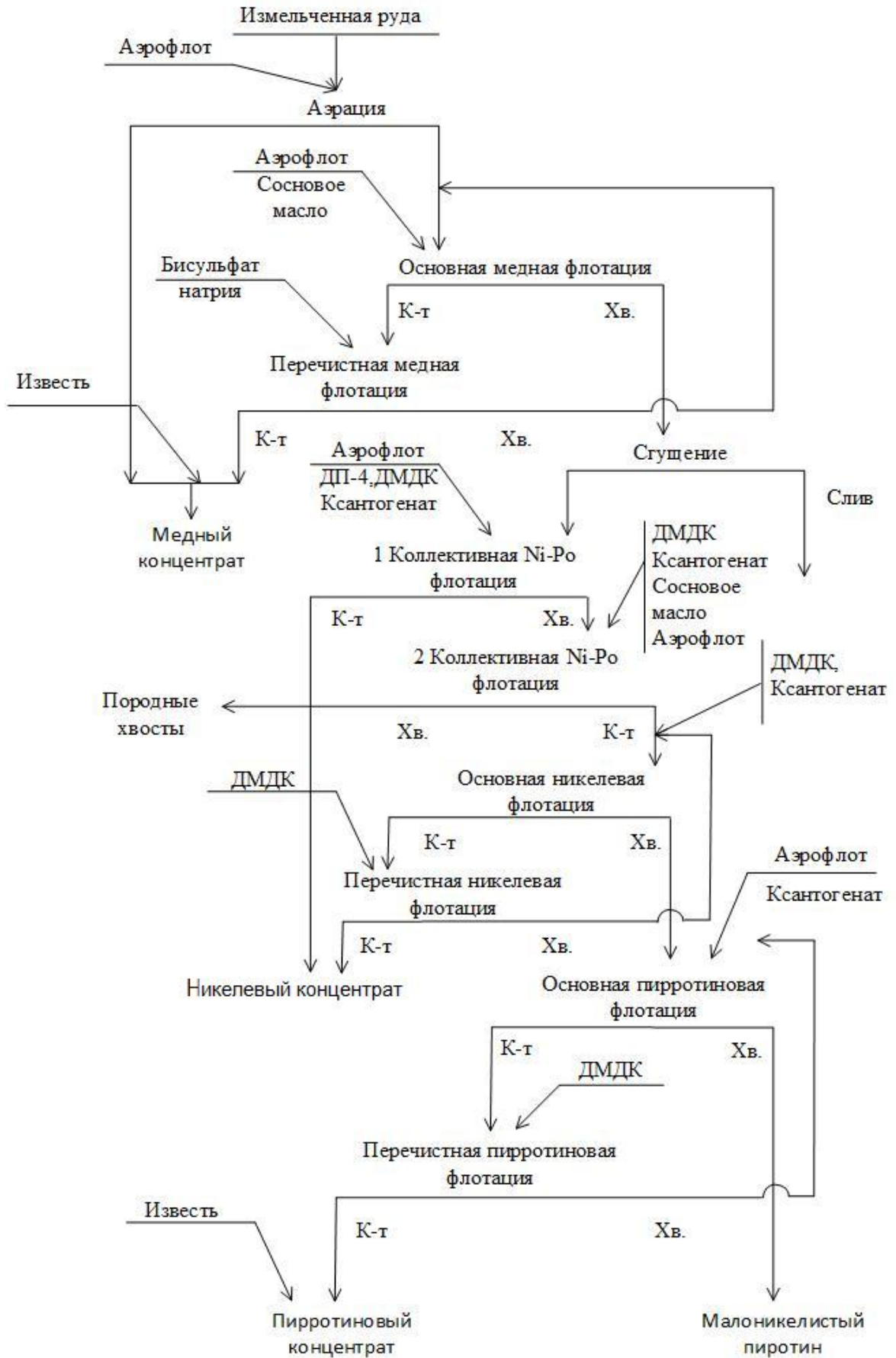


Рисунок 12 – Технологическая схема обогатительной фабрики

Архив передела сгущения содержит в себе минутные значения (всего 28 000) для четырех сгустителей и пульподелительной коробки, а именно:

- Плотность разгрузки сгустителя №5,6,7,8 – т/м^3 ;
- Загрузка сгустителя №5,6,7,8 – $\text{м}^3/\text{ч}$;
- Разгрузка сгустителя №5,6,7,8 – $\text{м}^3/\text{ч}$;
- Уровень слива сгустителя №5,6,7,8 – м;
- Содержание твердого в пульпе сгустителя №5,6,7,8 – относительное количество;
- Ток на граблину сгустителя №5,6,7,8 – А;
- Общая плотность передела сгущения – т/м^3 ;
- Общий объем разгрузки передела сгущения – $\text{м}^3/\text{ч}$;
- Уровень пульподелительной коробки – м;
- Плотность в пульподелительной коробке – т/м^3 .

Для создания модели использовался архивный отрезок данных за месяц, для проверки адекватности модели использовался отрезок данных за другой месяц. Такое разделение позволило оценить возможные ошибки в работе программного продукта Proficy Troubleshooter.

2.2.1 GE Proficy Troubleshooter

Первый этап обработки архива представляет собой работу с программным продуктом GE Proficy Troubleshooter.

Proficy Troubleshooter позволяет: обработать данные до нескольких миллионов сэмплов; найти корреляционные зависимости; выстроить набор нечетких правил для взаимодействующих величин; построить статистическую модель; предложить регулирование выбранного целевого параметра; создать систему управления и прогнозирования [113].

Proficy Troubleshooter – это комплекс аналитических инструментов, которые позволяют извлекать знания из существующих производственных данных. Эти инструменты работают с архивной производственной выгрузкой и

помогают идентифицировать причины существующих проблем, а также помогают предложить способы их предотвращения [114].

Начало работы с Proficy Troubleshooter подразумевает импорт данных в среду обработки, в случае с настоящей диссертационной работой это .csv файл.

Расшифровка данных:

- TK5678AVGD – средняя плотность всего передела сгущения, т/м³;
- TK5678F – объемный расход передела сгущения, м³/ч;
- TK5D(1,2) (TK6D(1,2), TK7D(1,2), TK8D(1,2)) – выходная плотность каждого сгустителя, т/м³;
- TK5F (TK6F, TK7F, TK8F) – загрузка пульпы в каждый сгуститель, м³/ч;
- TK5F(1,2) (TK6F(1,2), TK7F(1,2), TK8F(1,2)) – разгрузка пульпы из каждого сгустителя м³/ч;
- TK5P2 (TK6P2, TK7P2, TK8P2) – содержание твердого в разгрузке каждого сгустителя, %;
- TK5O (TK6O, TK7O, TK8O) – процент открытия клапана на загрузке каждого сгустителя, %;
- TK5Q (TK6Q, TK7Q, TK8Q) – мутность осветленного слоя в каждом сгустителе, г/л.

На рисунке 13 представлен график импортированных данных на примере общей плотности передела сгущения.

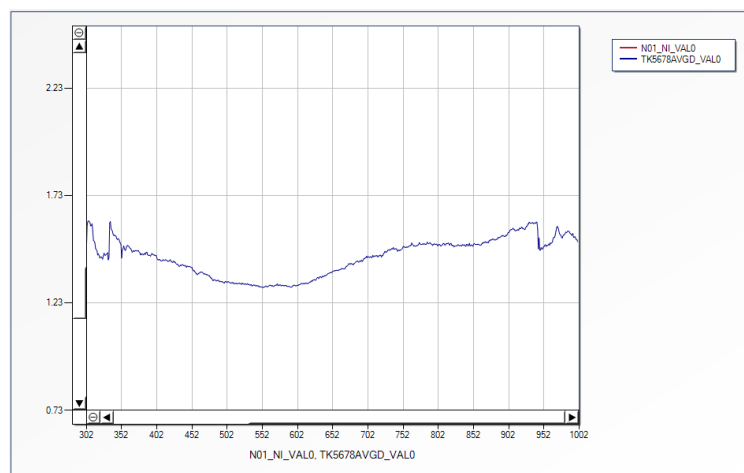


Рисунок 13 – График изменения общей плотности передела сгущения

Представленный выше график изменения плотности передела сгущения во времени, показывает, что величина целевого параметра процесса изменяется с сильными колебаниями, в дальнейшем такие колебания усложняют процесс получения никелевого концентрата с необходимым процентным содержанием Ni равным 9 % [67].

Исследование архивных данных передела сгущения и флотации медно-никелевых концентратов позволяет сделать вывод о том, что нестабильное значение плотности продукта процесса сгущения имеет значительное влияние на расход реагентов в дальнейшей обработке, а именно в отделении флотации. Для исследования были выбраны данные по расходу следующих реагентов: ДМДК, Ксантогенат, Аэрофлот, ДП-4, Сосновое масло [67].

Был проведен анализ факторов, влияющих на содержание никеля в выходном концентрате (Рисунок 14), согласно полученным данным, на содержание никеля высокое влияние оказывает расход ксантогената (обозначение параметра F21KF), расход аэрофлота (F21AF) и расход ДМДК (F21DF). Из анализируемых зависимостей можно сделать вывод о том, что вследствие нестабильного значения плотности на выходе передела сгущения, требуются значительные материальные затраты для дальнейшего получения высокого содержания Ni в концентрате, отправляемом на взвешенную плавку [67].

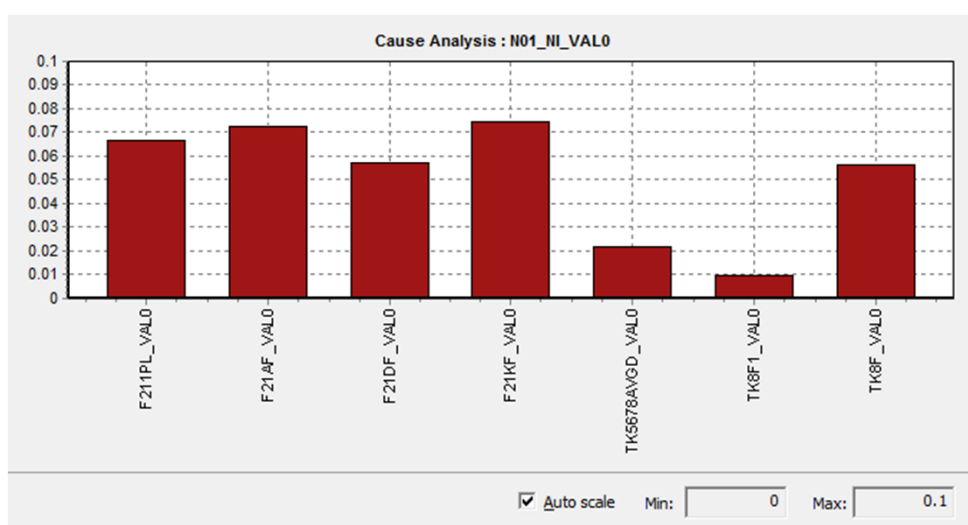


Рисунок 14 – Анализ факторов, влияющих на содержание Никеля в выходном концентрате.

Далее с помощью Proficy Troubleshooter были определены корреляционные зависимости между средней плотностью передела сгущения и расходом каждого из реагентов, а также степень влияния каждого из параметров [67]:

- TK5678AVG – F21AF: $\eta = 65,68\%$;
- TK5678AVG – F21DF: $\eta = 58,65\%$;
- TK5678AVG – F21KF: $\eta = 78,54\%$;

Эти данные обуславливают актуальность исследования процесса сгущения медно-никелевых концентратов, а также дальнейшую разработку системы автоматизированного управления.

Далее были рассмотрены корреляционные зависимости передела сгущения, а именно влияние разгрузки и загрузки сгустителей на их выходную плотность и содержание твердого, а также на общую плотность всего передела [109].

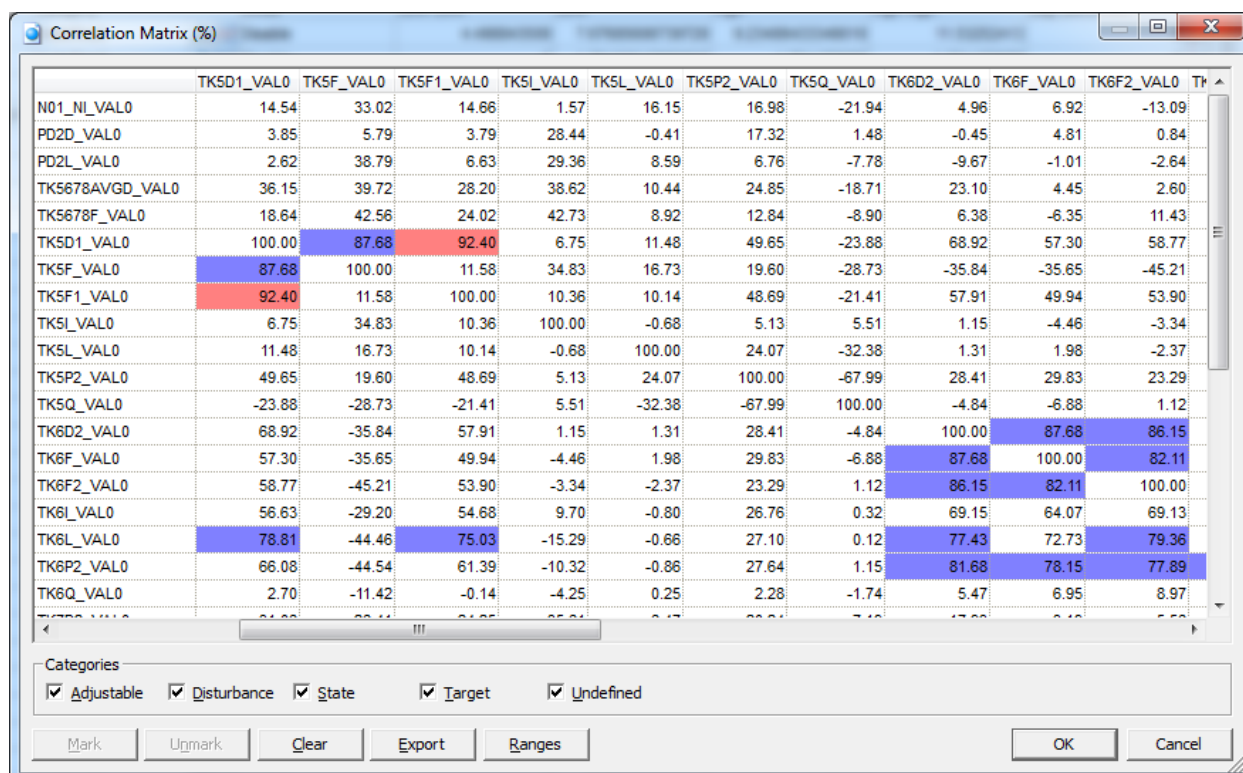


Рисунок 15 – Корреляционные зависимости

На рисунке 15 показаны корреляционные зависимости архивных данных передела сгущения, по ним можно увидеть четкую взаимосвязь величин плотности сгустителей (TK5D1, TK6D1, TK7D1, TK8D1) и их разгрузки (TK5F,

TK6F, TK7F, TK8F)/загрузки(TK5F1, TK6F1, TK7F1, TK8F1). В ходе обработки архивных данных, получены следующие зависимости:

- Зависимость плотности от загрузки: TK5D1:TK5F = 87,68 %;
- Зависимость плотности от разгрузки: TK5D1:TK5F1 = 92,40 %;
- Зависимость плотности от загрузки: TK6D2:TK6F = 87,68 %;
- Зависимость плотности от загрузки: TK6D2:TK6F = 86,15 %;
- Зависимость плотности от загрузки: TK7D1:TK7F = 91,32 %;
- Зависимость плотности от загрузки: TK7D1:TK7F = 89,23 %;
- Зависимость плотности от загрузки: TK8D1:TK8F = 85,94 %;
- Зависимость плотности от загрузки: TK8D1:TK8F = 87,22 %;

Исходя из этих данных, можно предположить, что управление сгустителями можно вести посредством разгрузки и загрузки.

Следующий шаг обработки данных – это построение модели по нечетким правилам. В Proficy Troubleshooter этот шаг называется «Model Construction» [113, 114].

При создании модели, РТ обрабатывает весь массив данных, выдавая «нечеткие» правила для каждой величины [113]. Чем больше зависимость – тем большее количество правил создает программный пакет. Перед созданием модели выбирается целевой параметр, в данном случае это средняя плотность передела сгущения, а также входные параметры процесса, в данном случае разгрузка и загрузка каждого из сгустителей.

Model statistics:	
Statistic	Value
Number of construction cases	14145
Number of validation cases	6062
Number of patterns not used for training	0
Model fit on construction cases	100%
Model fit on validation cases	99%

Рисунок 16 – Окно моделирования процесса в Proficy Troubleshooter

Стоит отметить, что в случае изменения диапазона работы процесса, созданная модель имеет возможность к обучению по новым архивным данным.

На рисунке 16 представлено окно GE Proficy Troubleshooter после обработки и создания модели. Получены следующие значения соответствия модели:

- Model fit on construction cases = 100%;
- Model fit on validation cases = 99%.

Модель в Proficy Troubleshooter имеет значительный (>95%) процент соответствия производственным данным. Ниже представлен графический вид сравнения моделированных и архивных данных.



Рисунок 17 – Графическое сравнение модели процесса и архивных данных

Рисунок 17 показывает, что модель, построенная с помощью Proficy Troubleshooter, практически идеально совпадает с архивными данными и имеет незначительные отклонения, а значит, может использоваться для дальнейшего исследования процесса сгущения медно-никелевых концентратов.

После построения модели, РТ дает возможность извлекать знания из построенных им правил (рисунок 18). Есть возможность оценить количественное влияние величин друг на друга во временном промежутке, что является очень полезным для понимания существующих проблем на производстве [114].

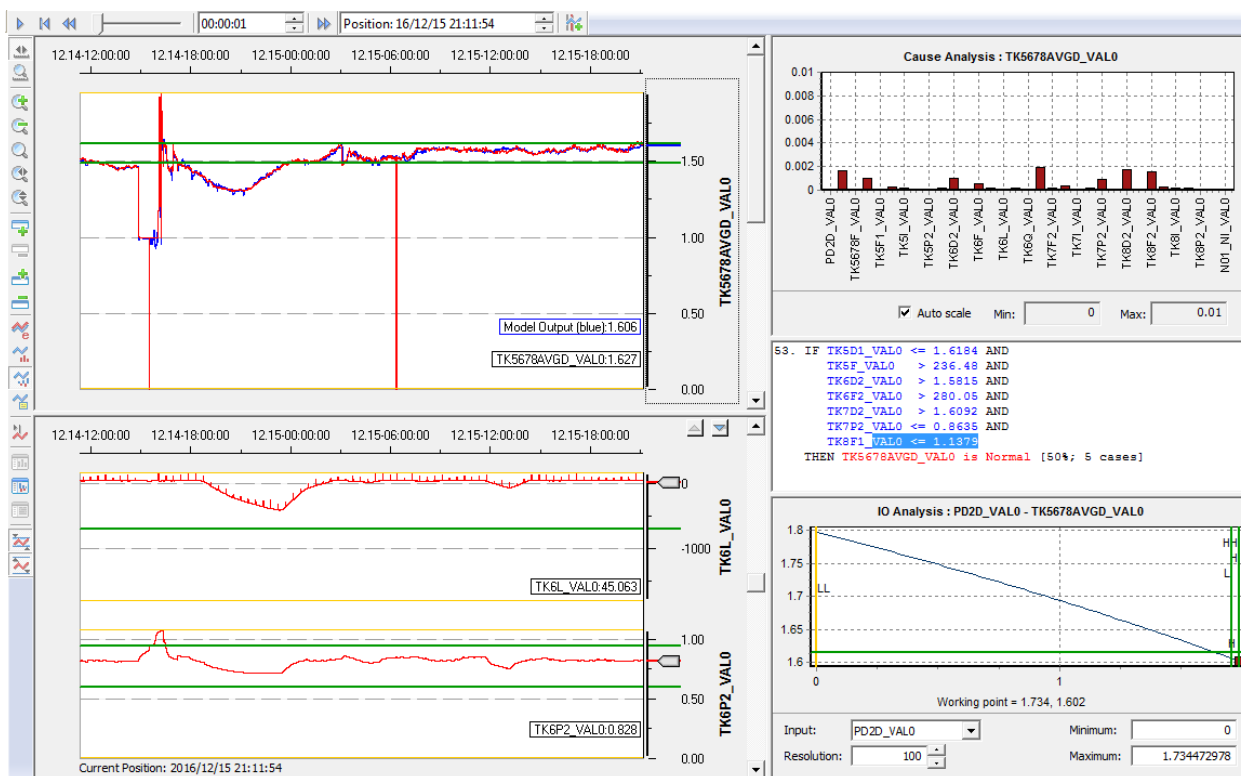


Рисунок 18 – Функция извлечение знаний

Перед определением влияющих факторов процесса сгущения в целом, было рассмотрено взаимодействие параметров одного сгустителя. Для этого был выбран отрезок данных, отражающий значения параметров процесса сгущения пульпы в сгустителе №5.

Для обработки архивных данных, а также для выявления взаимосвязанных параметров, требуется определение времени запаздывания.

Время запаздывания можно вводить вручную, в случае, когда есть возможность определить его либо опытным путем, либо на основе экспертных знаний сотрудников производства, а можно выполнить поиск значения времени запаздывания с помощью функции «Lag Estimation» (рисунок 19), в которой необходимо задать количество шагов, в отрезке которых Proficy Troubleshooter определит диапазон изменения величины при подаче управляющего сигнала.

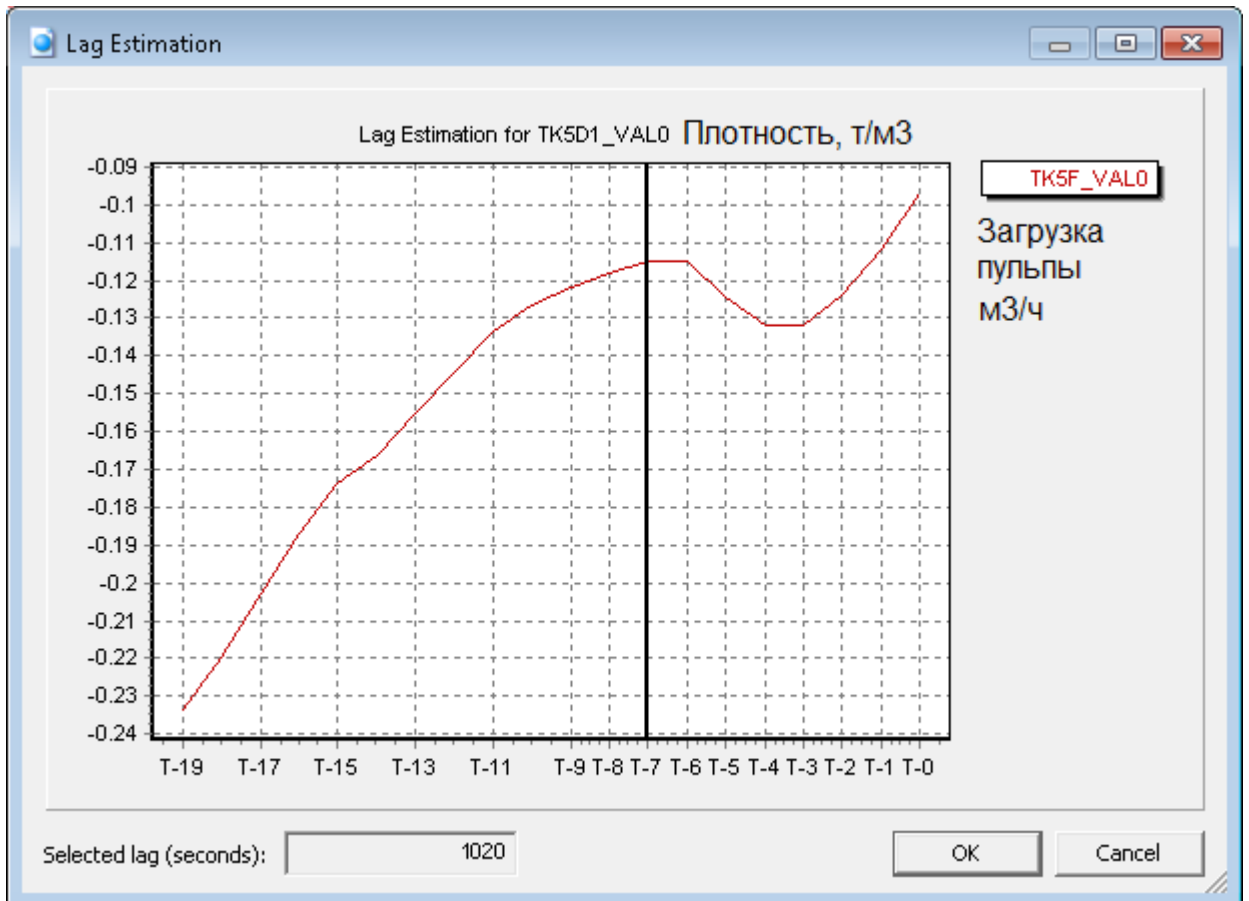


Рисунок 19 – Функция оценки времени запаздывания для изменения плотности относительно загрузки пульпы в сгуститель

С помощью функции оценки времени запаздывания [113], его значение было определено и оно равняется 1020 секундам.

Далее была создана модель пятого сгустителя, показатели сходимости которой имеют следующие значения:

- Model fit on construction cases = 97%;
- Model fit on validation cases = 97%.

Высокий процент сходимости модели с архивными данными позволяет использовать данную модель для изучения процесса сгущения пульпы в одном сгустителе. На рисунке 20 представлено графическое отображение сравнения модели и производственных данных.

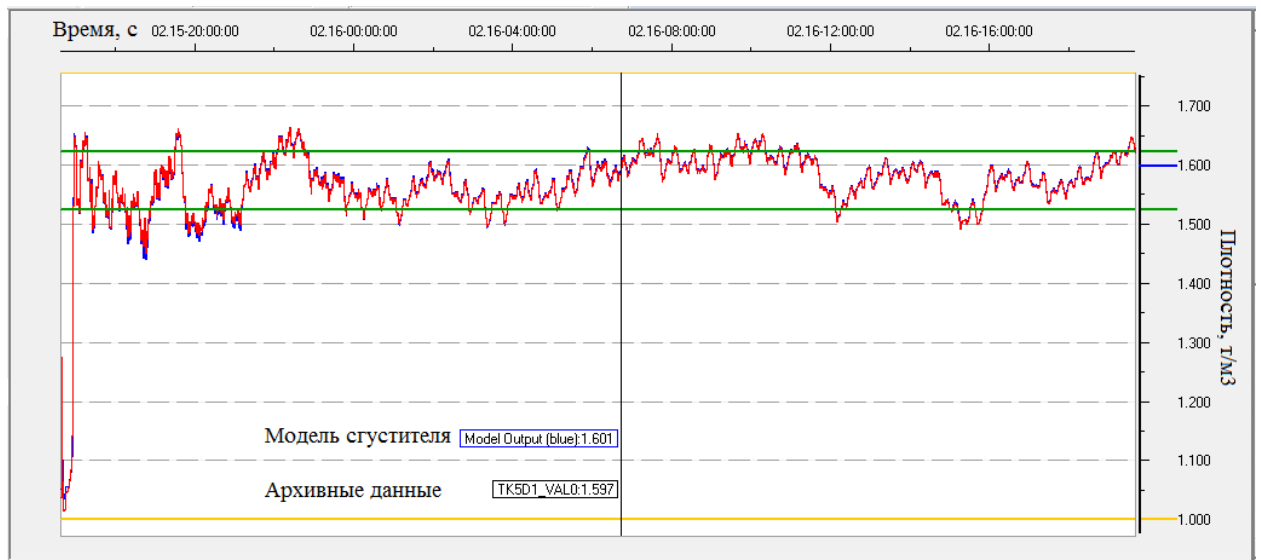


Рисунок 20 – Графическое сравнение расчетных значений плотности сгустителя №5 и архивных значений.

Далее потребовалось определить степень влияния основных факторов процесса сгущения на плотность продукта разгрузки, а так же установить тип такого влияния [109].

Для управления процессом сгущения были выбраны следующие параметры: загрузка пульпы в сгуститель (корреляционная зависимость 87,68 %);, разгрузка пульпы из сгустителя (корреляционная зависимость 92,40%). Остальные переменные архивного набора данных не имеют значимой корреляции с целевым параметром [109].

Количественное влияние разгрузки и загрузки пульпы на плотность выходного продукта представлено на рисунке 21, где используется следующая кодировка:

- TK5678AVG – значение общей плотности передела сгущения, т/м³;
- TK5D1 – значение плотности сгустителя №5, т/м³;
- TK5F – значение расхода на загрузке сгустителя, м³/ч;
- TK5F1 – значение расхода на разгрузке сгустителя, м³/ч.

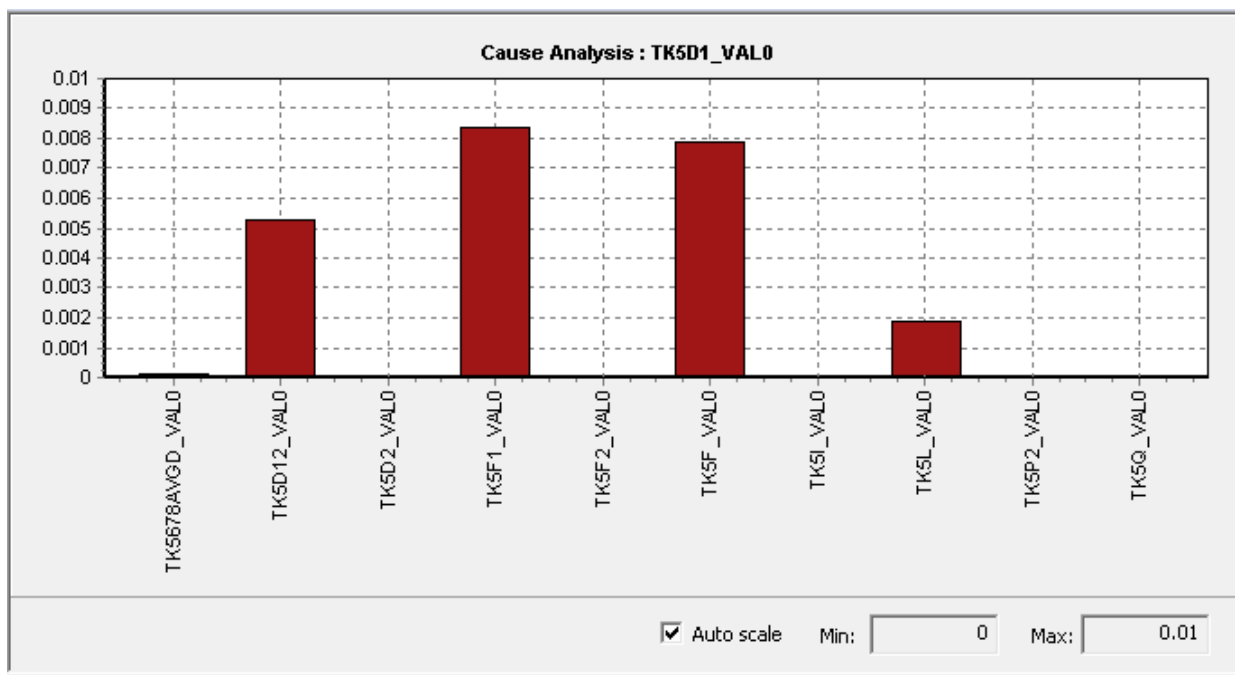


Рисунок 21 – Влияющие на плотность сгустителя факторы

Согласно гистограмме количественного влияния факторов на целевую функцию (TK5D1), загрузка (TK5F) и разгрузка (TK5F1) могут использоваться как управляющие сигналы процесса сгущения. Влияние этих двух факторов во всем отрезке архивных данных оставалось на высоком уровне.

Далее был определен вид зависимости плотности выходного продукта от каждого из двух вышеуказанных факторов. Для этого использовалась функция Proficy Troubleshooter извлечение знаний, которая, благодаря функции «что - если» позволяет отследить изменение выходного параметра в зависимости от влияющего фактора. На рисунке 21 представлен вид зависимости плотности от разгрузки.

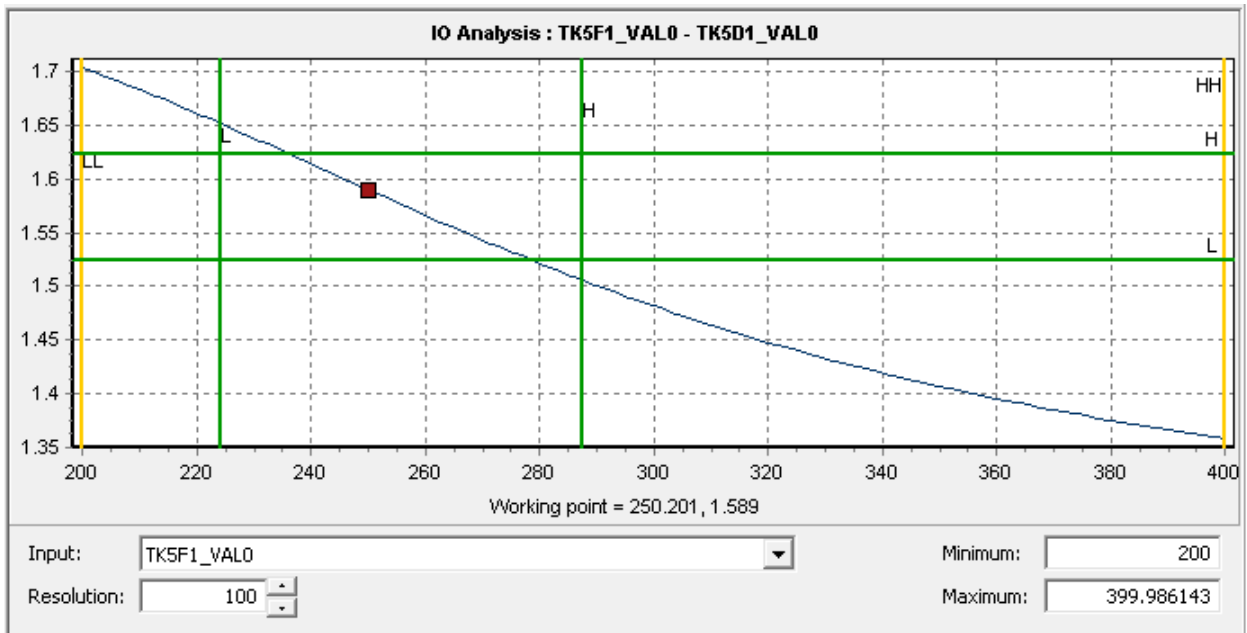


Рисунок 22 – Влияние разгрузки сгустителя (TK5F1) на выходную плотность (TKD1)

Согласно рисунку 22 зависимость между плотностью и разгрузкой близка к обратной линейной в диапазоне 200-290 м³/ч, однако при увеличении разгрузки до 300-400 м³/ч, уменьшение плотности происходит по гиперболе.

Далее рассмотрена взаимосвязь загрузки сгустителя №5 на его плотность:

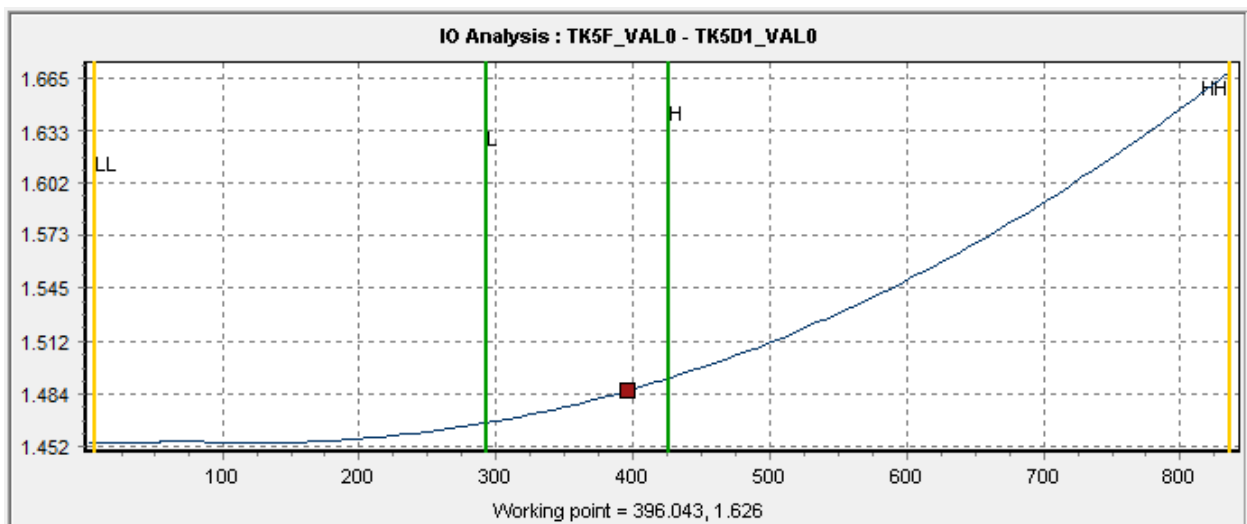


Рисунок 23 – Влияние загрузки сгустителя (TK5F) на выходную плотность (TK5D1)

Влияние загрузки на плотность стоит рассматривать в диапазоне 200 - 600 м³/ч, согласно технологической документации, значения вне этого диапазона являются аварийными.

После оценки влияющих на плотность факторов, на примере сгустителя №5, был сделан вывод о возможности управления всем переделом сгущения посредством разгрузки/загрузки параллельно работающих сгустителей [109].

Следующий шаг обработки данных это возможная оптимизация модели. Для ее настройки необходимо в Proficy Troubleshooter задать следующие значения:

- $SP = 1,5 \text{ т/м}^3$;
- Расхождение = 5%;
- Управляющие сигналы и их диапазоны: ТК5F (200-600), ТК5F1 (200-400), ТК6F (200-600), ТК6F1 (200-400), ТК7F (200-600), ТК7F1 (200-400), ТК8F (200-600), ТК8F1 (200-400).

После задания параметров, Proficy Troubleshooter выполняет оптимизацию созданной ранее модели, а именно изменяет управляющие сигналы в заданном диапазоне так, чтобы целевая функция была равна значению уставки с разрешенной ошибкой, при этом используется прогнозирующее управление процессом на основе модели [109].

На рисунке 24 представлен график оптимизированной величины плотности в сравнении с моделью во времени.

На рисунке 25 представлен график изменения управляющих величин на примере разгрузки сгустителя №5.

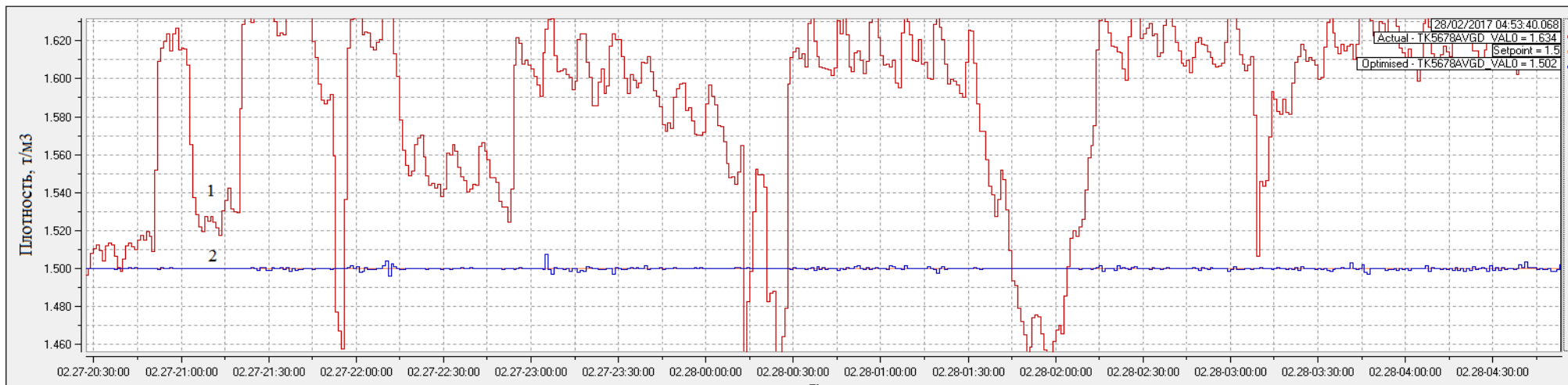


Рисунок 24 – Сравнение оптимизированного значения средней плотности передела сгущения и архивных данных где 1 – моделированное значение выходной плотности передела сгущения, 2 – оптимизированное значение плотности

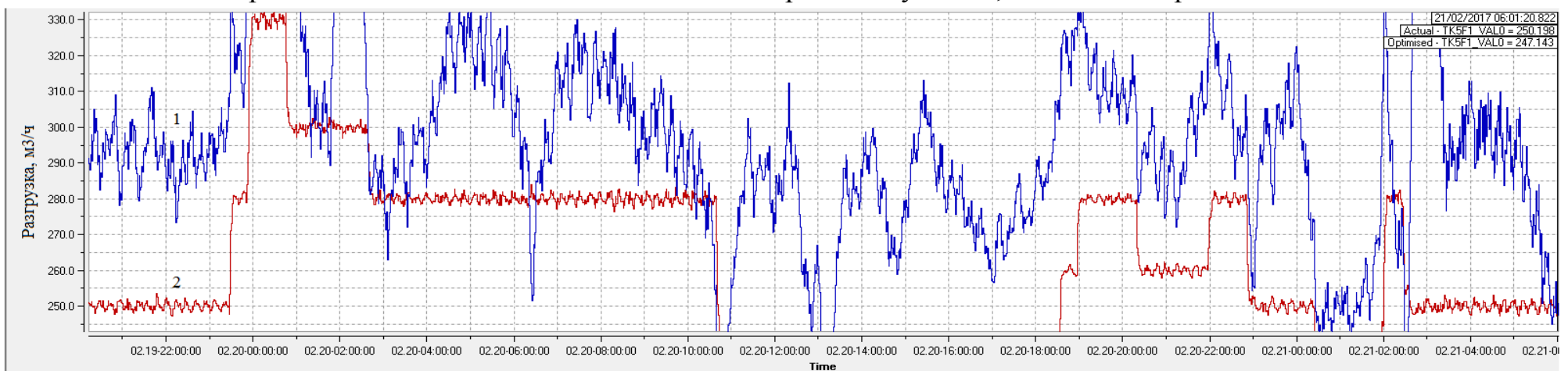


Рисунок 25 – Сравнение оптимизированного значения разгрузки сгустителя и архивных данных где 1 – оптимизированное значение разгрузки сгустителя, 2 – моделированное значение разгрузки

После создания модели и оптимизации целевого параметра, модель можно экспортировать в расширение программного пакета GE Proficy Architect (Рисунок 26).

Компонент Architect предоставляет возможность использовать полученную в Proficy Troubleshooter модель для реализации производственных задач, например связь со сторонним ПО и управление процессом [113, 114]. Также данный компонент имеет в себе набор блоков, с помощью которых можно провести тонкую настройку модели, ее обучение новым данным, ее нелинейную оптимизацию.

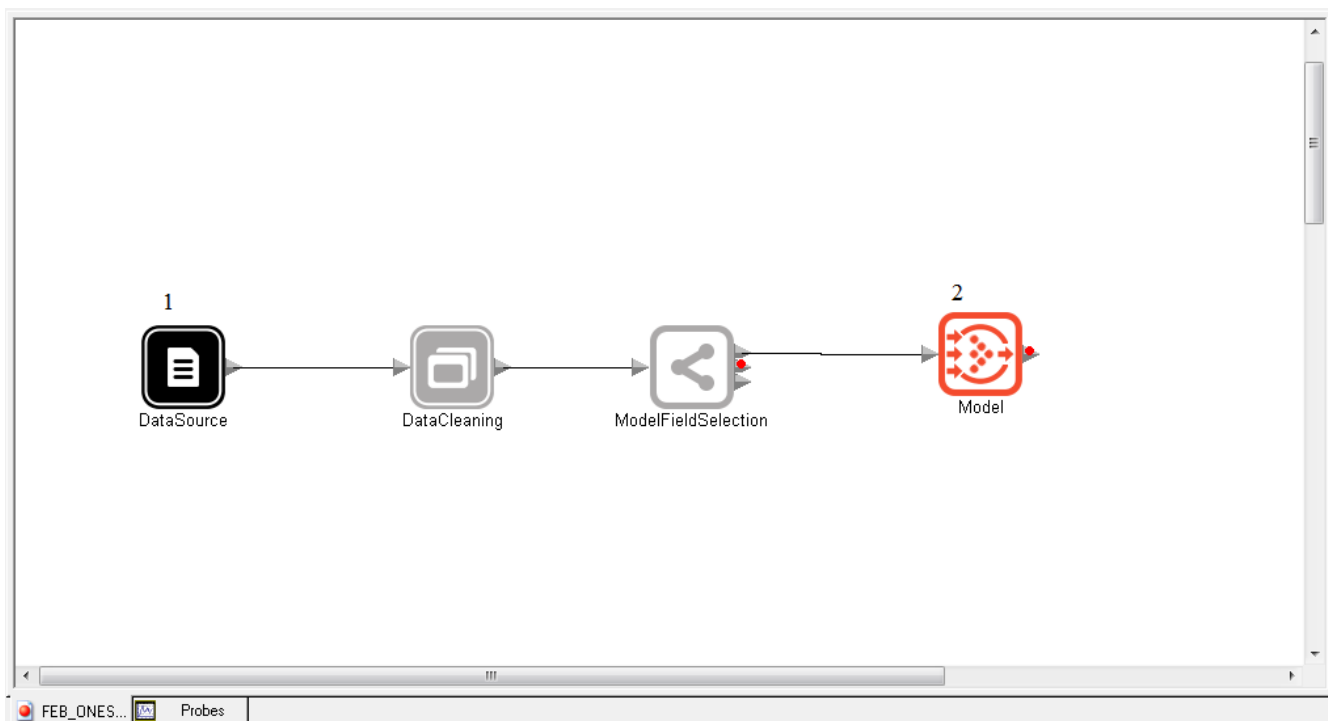


Рисунок 26 – Модель передела сгущения в среде Architect

где 1 – источник данных, 2- модель процесса

На рисунке 26 изображена визуализация модели в среде Architect, как можно видеть разработка в данном компоненте происходит посредством добавления различных блоков и соединение их линиями связи. Источник данных имеет в своих настройках путь к файлу с архивными данными, который можно подменять новым файлом, например, если диапазон процесса изменился, также вместо источника данных можно использовать блок для связи с OPC сервером, который позволит получать данные напрямую из ПЛК или SCADA системы.

В компоненте Architect добавлена оптимизация модели посредством блока Non-Linear Optimization (Рисунок 27):

В настройках блока «NonLinearOptimization» используются следующие настройки:

- Критерий оптимизации: модуль (1,5-TK5678AVG) -> min;
- Управляющие воздействия TK5F,TK5F1, TK6F,TK6F1, TK7F,TK7F1, TK8F,TK8F1.
- Ограничения по управлению. Для загрузки – 280-450 м³/ч, для разгрузки – 200-350 м³/ч.

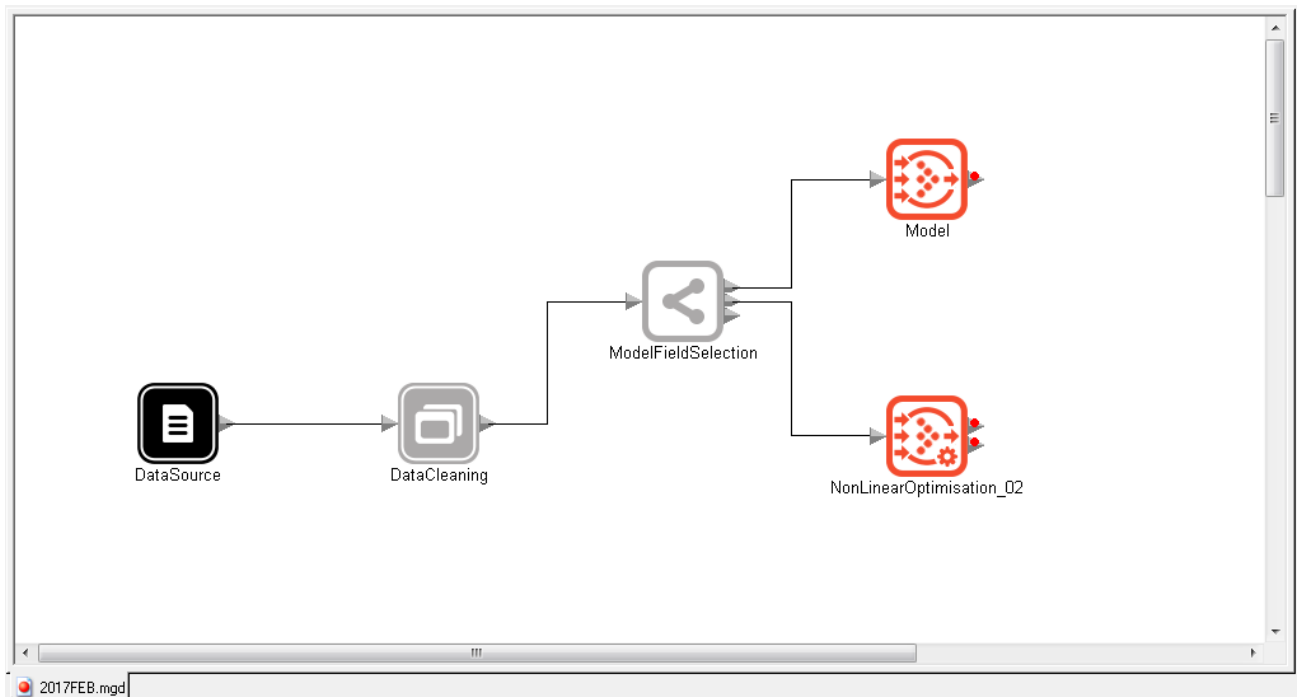


Рисунок 27 – Модель с оптимизацией в среде Architect

Для просмотра и сравнения результатов работы оптимизационного блока, в Proficy Architect существует режим симуляции, при использовании которого, программа, используя архивный файл, воспроизводит сохраненный в нем отрезок данных, при этом изменяя выбранные управляющие параметры для получения оптимального значения целевого параметра.

Результат работы представлен на рисунке 28, где сравниваются смоделированные и оптимизированные значения.

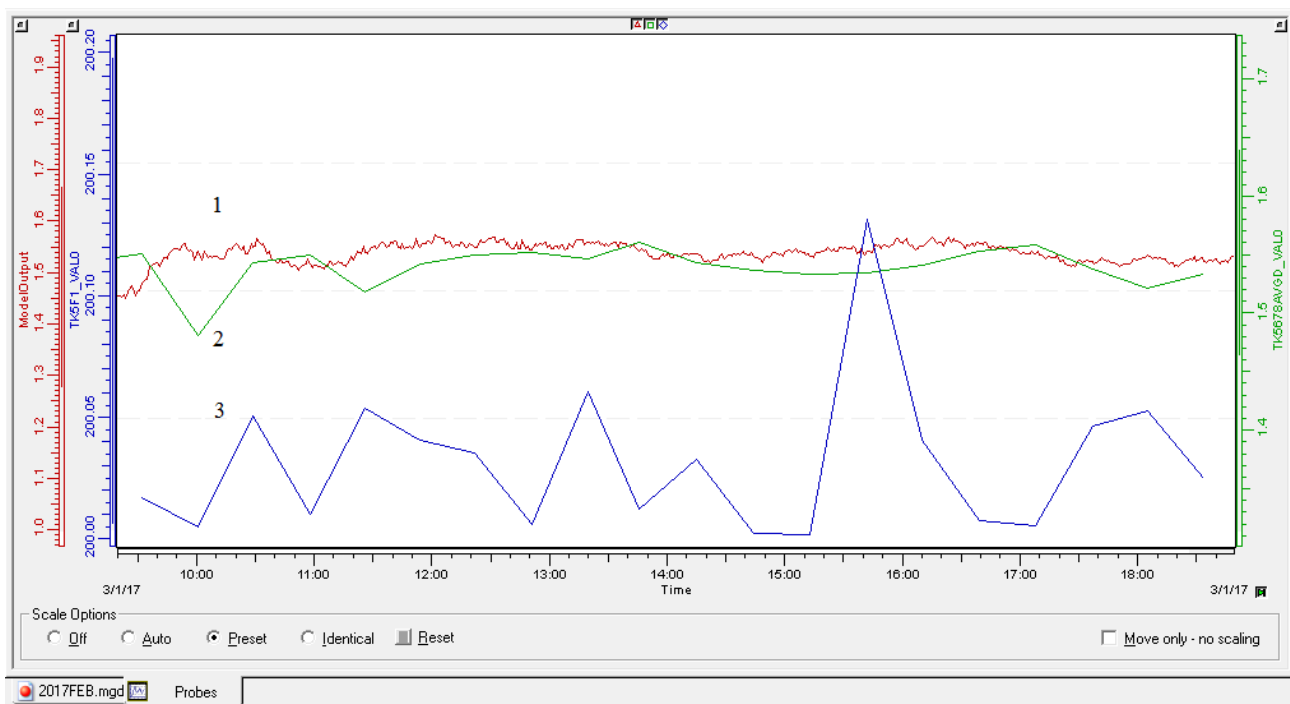


Рисунок 28 – Результаты работы оптимизированной модели передела сгущения, где 1 – моделированное значение плотности передела сгущения, 2 – оптимизированное значение плотности передела сгущения, 3 – управляющее воздействие, разгрузка сгустителя №5.

В данной части главы было проведено моделирование процесса сгущения медно-никелевого концентрата. С помощью Proficy Troubleshooter были определены основные влияющие на процесс факторы – это разгрузка и загрузка сгустителей, помимо этого был определен характер этой связи.

В программном продукте Proficy Troubleshooter была сформирована система управления, позволяющая с помощью регулятора с прогнозирующей моделью стабилизировать процесс сгущения. В ходе работы системы управления плотность передела сгущения держалась на заданной уставке = $1,5 \text{ т/м}^3$, колебания управляемой величины от уставки составили $\pm 0,05 \text{ т/м}^3$.

2.2.2 Обработка в программном пакете RTD

Второй этап обработки архива представляет собой работу с программными продуктами RTD и MATLAB.

Статистический пакет RTD позволяет моделировать процессы, происходящие в различных аппаратах, при этом опираясь на производственные данные [112].

Первоначальная обработка данных была произведена в среде MS Excel, в которой были найдены влияющие на целевой параметр переменные. Согласно данным технологии процесса сгущения медно-никелевого концентрата, время запаздывания процесса составляет 18 минут. При определении зависимостей между переменными, данное время учитывалось.

При обработке архивных данных были выбраны два управляющих воздействия – загрузка сгустителя, разгрузка сгустителя, так как эти воздействия при регрессионном и дисперсионном анализе показали высокие результаты взаимодействия.

Далее представлены результаты анализа «плотность пульпы на выходе сгустителя – загрузка сгустителя» проведенного при 16580 наблюдениях.

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,9590$, данный коэффициент характеризует тесноту линейной корреляционной связи между двумя величинами (плотность – загрузка) [15, 45].

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,9198$ и рассчитывается следующим образом [40]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (75)$$

Коэффициент детерминация является долей дисперсии зависимой переменной, которая объясняется изучаемой моделью, а именно, математический смысл коэффициента это единица минус доля дисперсионной ошибки модели. Чем ближе значение R^2 к единице, тем сильнее зависимость двух переменных.

Стандартная ошибка регрессии $S = 0,009736$ и рассчитывается по следующей формуле [45]:

$$S = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n(n-2)}} \quad (76)$$

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}))^2 \quad (77)$$

Сумма квадратов регрессии $SS = 0,04456$ и рассчитывается по следующей формуле [13]:

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}))^2 \quad (78)$$

Далее представлены результаты анализа «плотность пульпы на выходе сгустителя – разгрузка сгустителя» проведенного при 16580 наблюдениях.

Коэффициент множественной корреляции $R = 0,9443$, данный коэффициент характеризует тесноту линейной корреляционной связи между двумя величинами (плотность – разгрузка) [15, 45].

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,8918$ и рассчитывается следующим образом:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (79)$$

Коэффициент детерминация является долей дисперсии зависимой переменной, которая объясняется изучаемой моделью, а именно, математический смысл коэффициента это единица минус доля дисперсионной ошибки модели. Чем ближе значение R^2 к единице, тем сильнее зависимость двух переменных.

Стандартная ошибка регрессии $S = 0,0117$ и рассчитывается по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\frac{SS_{res}}{n(n-2)}} \quad (80)$$

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}))^2 \quad (81)$$

Сумма квадратов регрессии $SS = 0,2756$ и рассчитывается по следующей формуле:

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - (\hat{a}x_i + \hat{b}))^2 \quad (82)$$

После определения влияющих факторов набор архивных данных был разделен на отрезки данных по разгрузке ($F1$):

- $F \in (132-650)$, $F1 \in (185-200)$;

- $F \in (132-650), F1 \in (200-210)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (210-220)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (220-240)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (240-260)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (260-275)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (275-295)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (295-315)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (315-335)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (335-350)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (355-375)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (375-395)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (395-415)$;
- $F \in (132-650), F1 \in (415-435)$.

Для каждого из диапазонов интервально менялась загрузка F с шагом $10 \text{ м}^3/\text{ч}$, посредством чего были найдены средние значения плотности соответствующие значению загрузки. Далее был проведен регрессионный анализ двух влияющих факторов на целевую переменную. Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,8918$, значение стандартной ошибки $S = 0,1173$. Вследствие регрессионного анализа возмущающими на выходную плотность воздействиями были выбраны загрузка сгустителя и разгрузка сгустителя.

Для моделирования были использованы данные сгустителя №5. Рассмотрено влияние загрузки пульпы в сгуститель. С помощью MS Excel найден отрезок данных, в котором разгрузка сравнительно не изменяется ($\pm 0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$). Также в этом отрезке необходимо найти скачок по загрузке пульпы, это требуется для получения кривой разгона сгустителя [48]. Для модели выбран срез данных, показанный в таблице 6.

Таблица 6 – Изменение плотности после скачка загрузки

Время, с	Загрузка, м ³ /ч	Плотность кг/м ³	Разгрузка, м ³ /ч
0	417.26	1560.040	269.92
60	456.49	1560.250	269.92
120	455.74	1561.490	269.97
180	455.69	1561.063	270.00
240	456.01	1565.252	269.99
300	455.56	1566.340	269.91
360	456.16	1568.063	269.98
420	456.18	1575.418	269.97
480	456.22	1582.713	269.96
540	456.01	1583.860	269.91
600	456.25	1585.656	270.01
660	456.37	1596.670	269.99
720	455.79	1597.890	270.01
780	455.60	1599.790	269.92
840	445.70	1604.679	270.00
900	445.51	1604.777	269.94
960	455.22	1604.792	269.93
1020	450.25	1604.796	269.91
1080	455.13	1604.799	269.97
1140	452.07	1605.000	269.94
1200	449.10	1605.023	269.95
1260	453.79	1605.001	269.95
1320	454.56	1604.996	269.98
1380	447.04	1604.989	270.00

В таблице выше можно наблюдать возмущающее воздействие по загрузке пульпы в сгуститель. Изменение составляет + 39 м³/ч. Изменение плотности на разгрузке составляет + 44,96 кг/м³. Графическое представление таблицы 6 показано на рисунке 29.

Изменение плотности во времени принято за кривую разгона, позволяющую разработать динамическую модель процесса.

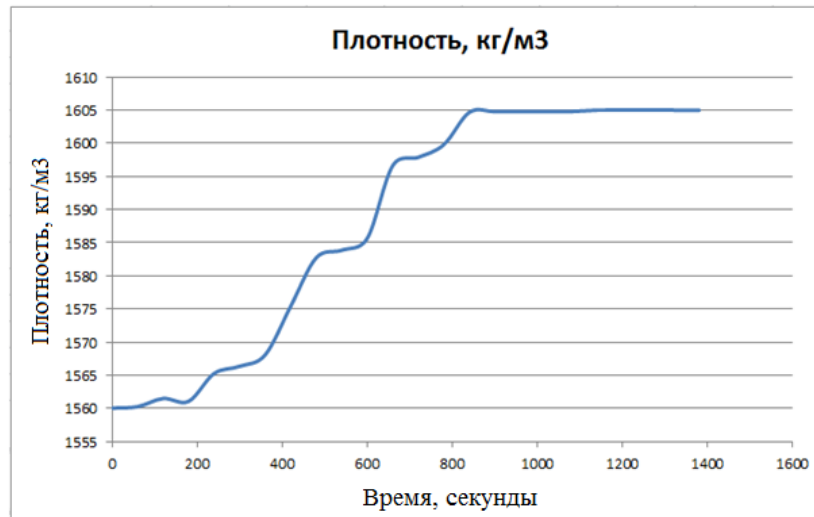


Рисунок 29 – Изменение плотности во времени после скачка загрузки

Полученная кривая разгона (Рисунок 29) была загружена для статистической обработки в программный пакет RTD, перед этим величина управления и выходная величина были нормированы (Рисунок 30).

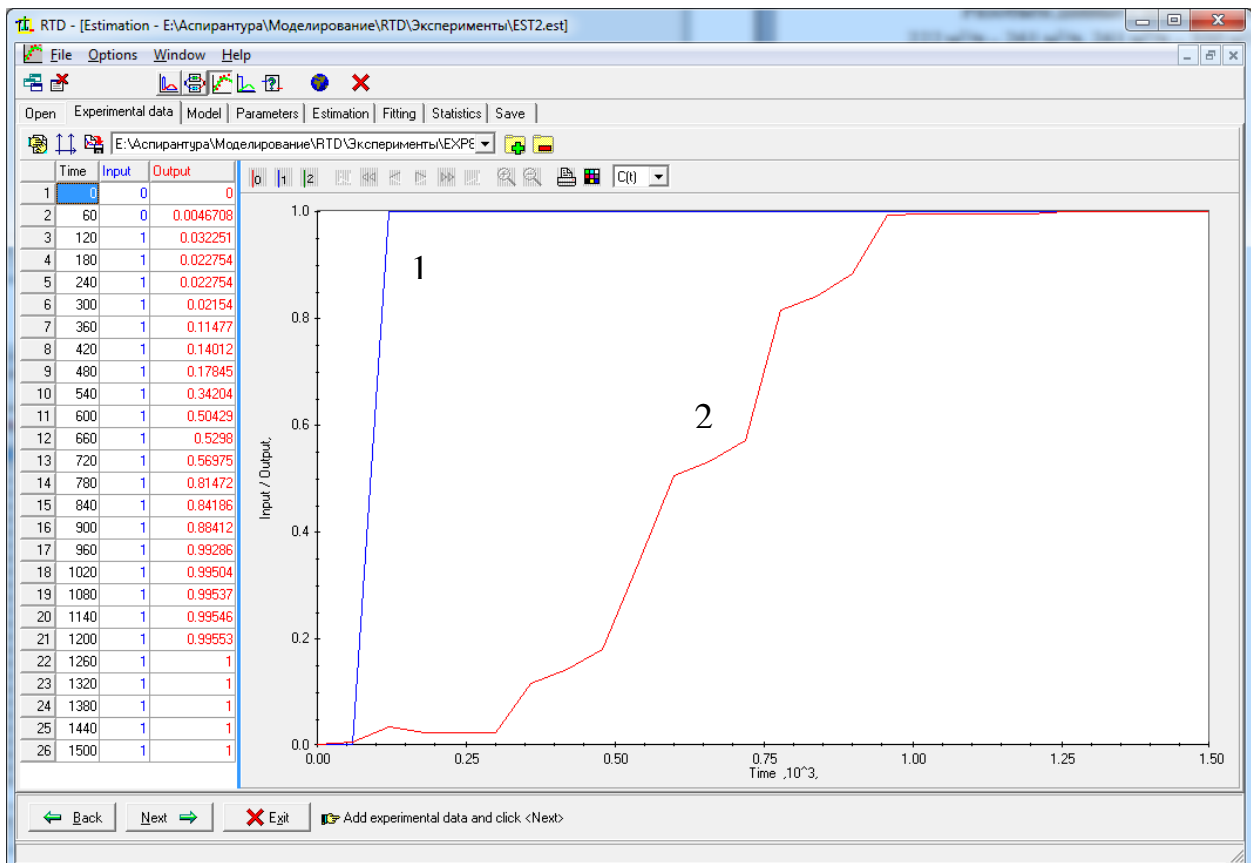


Рисунок 30 – График нормированных значений в пакете RTD где 1 – возмущающее воздействие, 2 – кривая разгона сгустителя.

После загрузки проведен оценочный эксперимент, с созданием ячеечной модели, состоящей из четырех ячеек идеального перемешивания и одного звена транспортного запаздывания (Рисунок 31). Количество ячеек и время пребывания подбирались опытным путем, посредством проведения ряда экспериментов. Максимальное схождение с кривой разгона показывает модель с четырьмя ячейками и звеном запаздывания, при этом ячейки соответствуют зонам сгустителя, которые были рассмотрены в первой части настоящей главы.

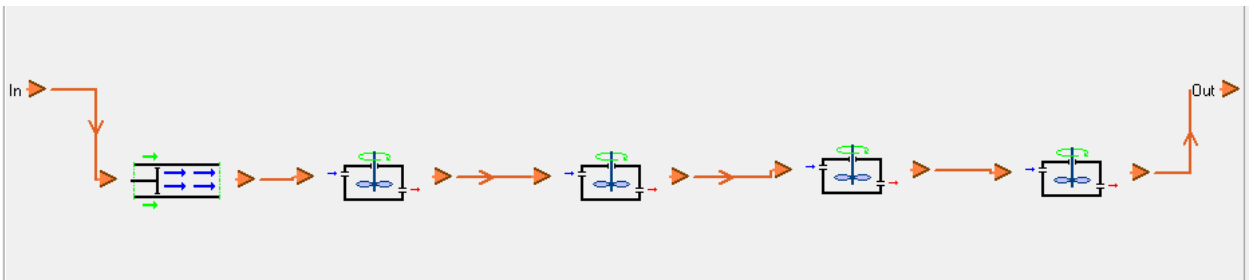


Рисунок 31 – Ячеечная модель

В соответствии с архивными данными и обработкой их в программном пакете RTD, получены следующие значения времени нахождения пульпы в каждой зоне сгустителя (Рисунок 32):

- Время транспортного запаздывания = 150 секунд, данный блок соответствует времени подачи пульпы от клапана до сгустителя, а также содержит в себе время нахождения пульпы в зоне осветленного раствора (Рисунок 7);
- В зоне первоначального осаждения пульпа находится 105 секунд;
- В промежуточной зоне пульпа находится 90 секунд;
- Время нахождения в зоне сжатия равняется 82 секунд;
- В зоне плотного осадка нахождение пульпы равняется 120 секунд.

CSTR <0>	Unit	Min	Value	Max	Variable
Average residence time	s		0	150	150 YES
CSTR <1>	Unit	Min	Value	Max	Variable
Average residence time	s		100	105	105 YES
CSTR <2>	Unit	Min	Value	Max	Variable
Average residence time	s		80	90	90 YES
CSTR <3>	Unit	Min	Value	Max	Variable
Average residence time	s		79	82	82 YES
PFR <0>	Unit	Min	Value	Max	Variable
Residence time	s		100	120	120 YES

Рисунок 32 – Параметры каждой ячейки модели

После выбора ячеечной модели и расчета параметров каждой ячейки, проводится моделирование процесса в аппарате сгущения. Рисунок 33 показывает график работы модели в сравнении с архивными данными.

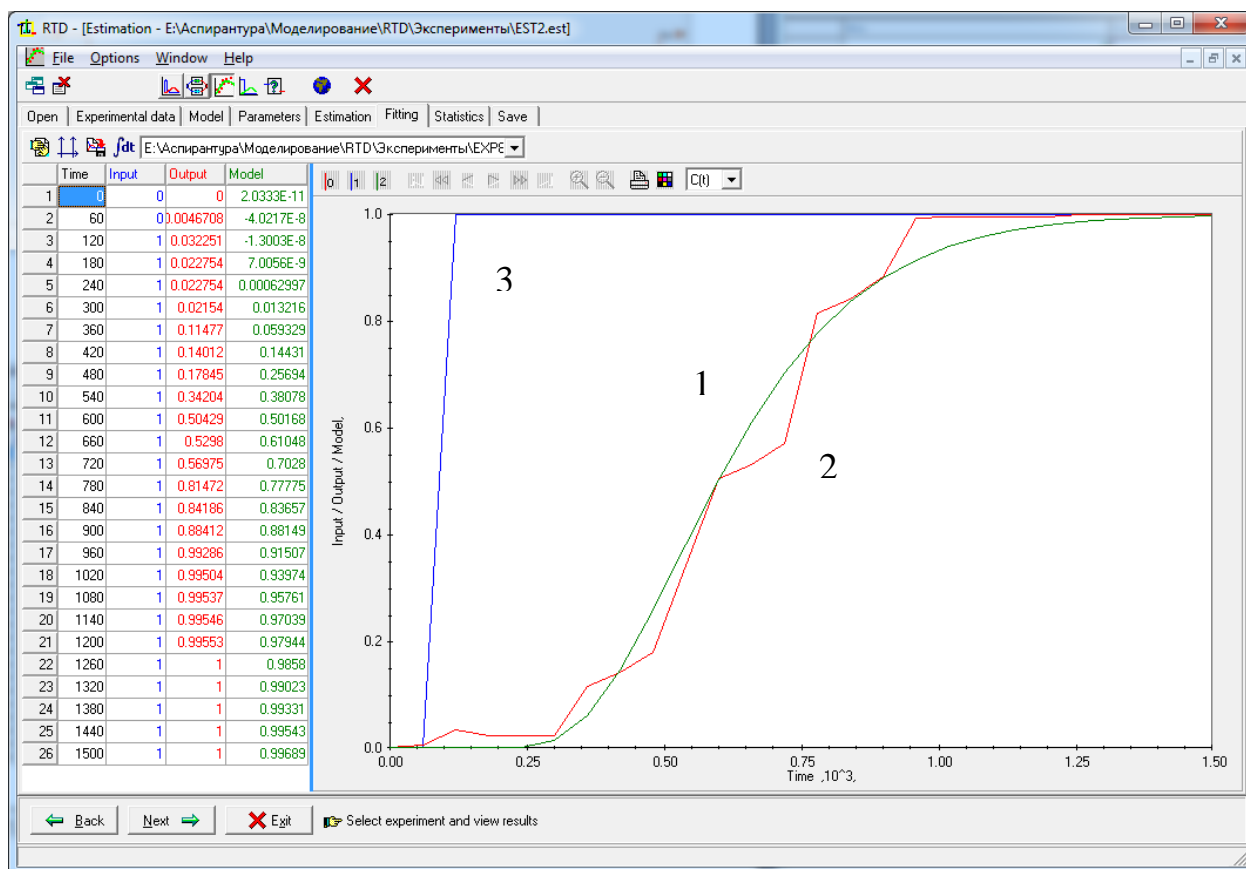


Рисунок 33 – Моделирование процесса

где 1 – результат работы модели, созданной в RTD, 2 – кривая разгона сгустителя, 3 – возмущающее воздействие.

После проведения оценочного эксперимента в пакете RTD была получена передаточная функция объекта:

$$W(p) = \left(\frac{1}{(150p + 1)} \times \frac{1}{(105p + 1)} \times \frac{1}{(85p + 1)} \times \frac{1}{(80p + 1)} \right) e^{-p120}$$

Помимо загрузки сгустителя, высокое влияние на плотность сгущения имеет и разгрузка.

С помощью MS Excel найден отрезок данных, в котором загрузка сравнительно не изменяется. Также в этом отрезке потребовалось найти скачок по разгрузке пульпы, это необходимо для получения кривой разгона сгустителя. Для модели выбран следующий срез данных, показанный в таблице 7.

Таблица 7 – Изменение плотности после скачка разгрузки

Время, с	Разгрузка м ³ /ч	Плотность кг/м ³	Загрузка м ³ /ч
0	250.00	1662.31	430.934
60	272.14	1662.31	430.819
120	271.83	1662.31	430.987
180	272.47	1661.45	430.985
240	272.84	1652.60	431.194
300	272.41	1645.39	430.614
360	274.55	1641.74	430.732
420	278.29	1636.81	431.234
480	277.85	1620.73	430.745
540	279.56	1606.95	430.708
600	280.58	1604.65	430.808
660	281.37	1584.05	430.555
720	281.31	1571.12	431.212
780	281.34	1571.12	431.015
840	281.45	1571.13	431.195
900	281.89	1571.00	430.592
960	281.43	1571.00	430.726

В таблице выше можно наблюдать возмущающее воздействие по разгрузке пульпы в сгуститель. Изменение составляет + 31,43 м³/ч. Изменение плотности на разгрузке составляет - 91,31 кг/м³. При сравнении влияния разгрузки и загрузки сгустителя на плотность можно определить, что расход разгрузки при одинаковом скачке меняет плотность значительно быстрее и на большее значение. Графическое представление таблицы 7 показано на рисунке 34.



Рисунок 34 – Изменение плотности во времени после скачка разгрузки

Далее кривая разгона в виде нормированных значений была загружена в программный пакет RTD (Рисунок 35).

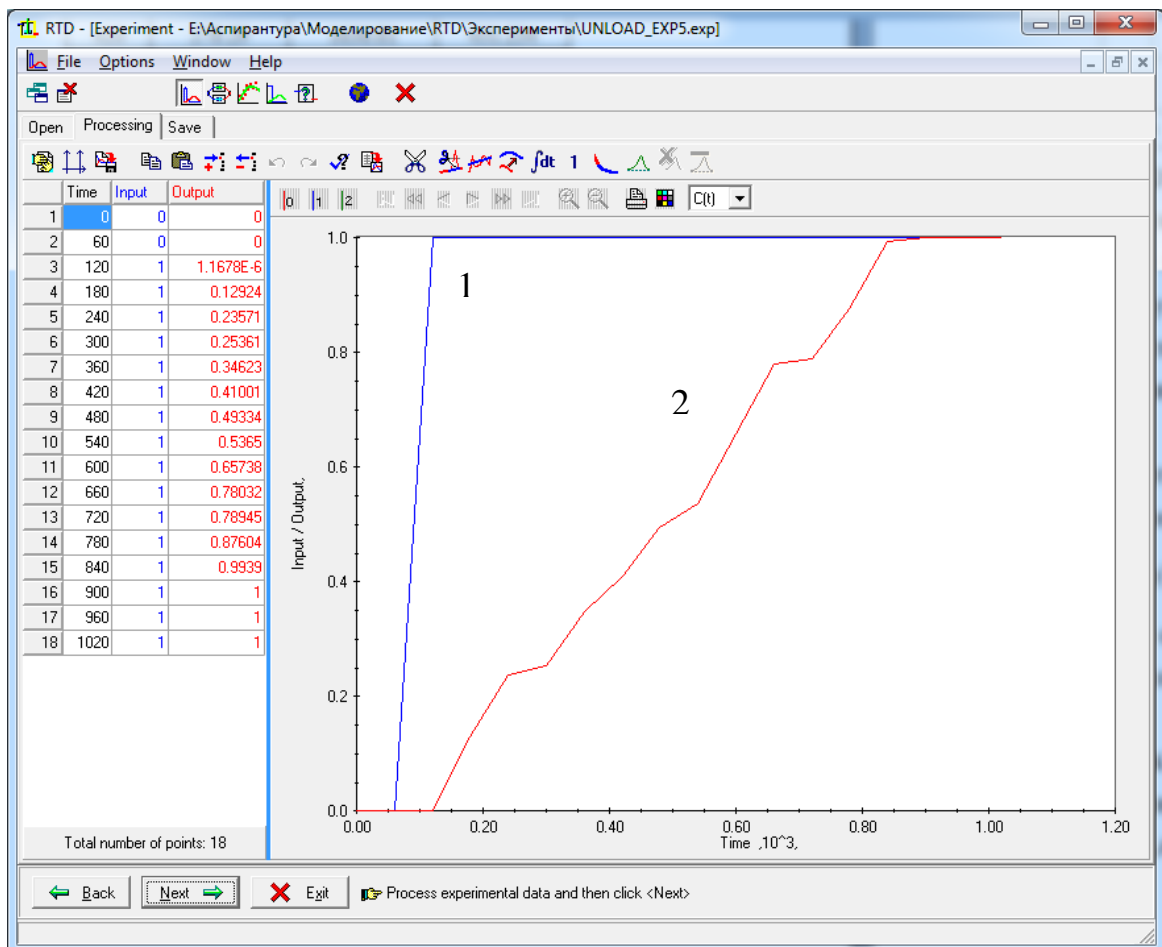


Рисунок 35 – График нормированных значений в пакете RTD

где 1 – возмущающее воздействие, 2 – реакция выходного параметра.

После загрузки был проведен оценочный эксперимент, с использованием ячеечной модели, состоящей из четырех ячеек идеального перемешивания. Количество ячеек было определено опытным путем, время нахождения пульпы в каждой ячейке было рассчитано посредством функций пакета RTD (Рисунок 37):

- В зоне первоначального осаждения пульпа находится 65 секунд;
- В промежуточной зоне пульпа находится 100 секунд;
- Время нахождения в зоне сжатия равняется 115 секунд;
- В зоне плотного осадка нахождение пульпы равняется 117 секунд.

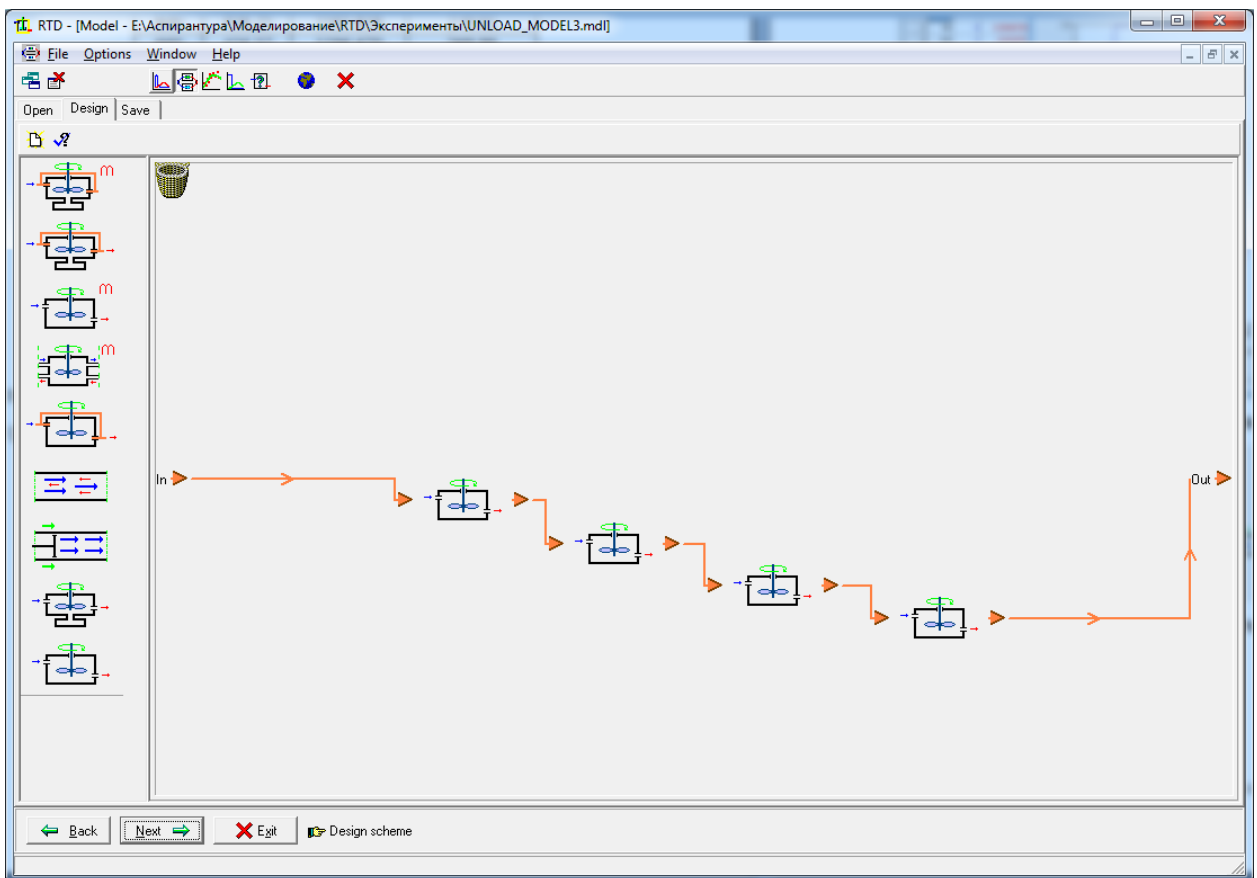


Рисунок 36 – Ячеечная модель

Unit	Min	Value	Max	Variable
CSTR <0>				
Average residence time	s	40	65	65 YES
CSTR <1>				
Average residence time	s	80	100	100 YES
CSTR <2>				
Average residence time	s	100	115	115 YES
CSTR <3>				
Average residence time	s	110	117	117 YES

Рисунок 37 – Параметры каждой ячейки

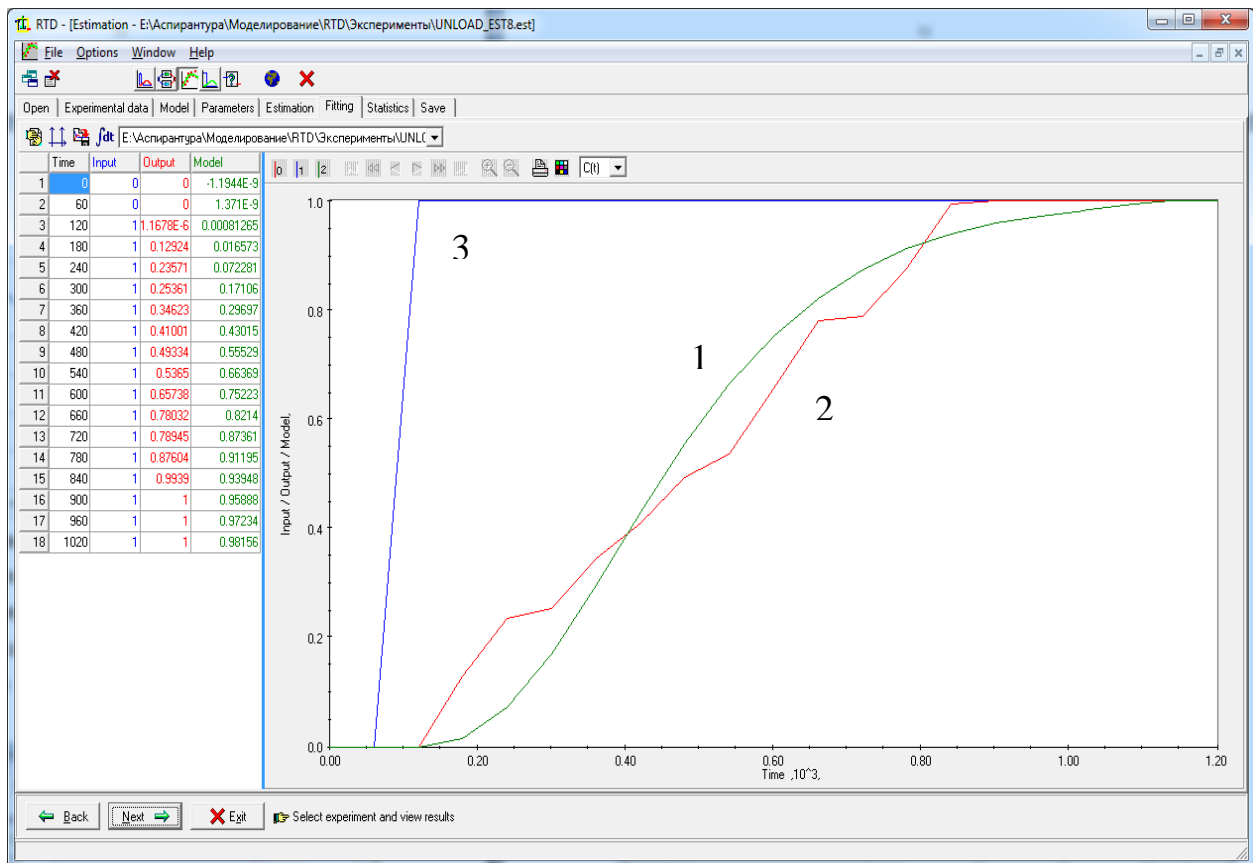


Рисунок 38 – Моделирование процесса

где 1 – результат работы модели, созданной в RTD, 2 – кривая разгона сгустителя,
3 – возмущающее воздействие

В результате моделирования (Рисунок 38), была получена следующая передаточная функция:

$$W(p) = \frac{1}{(65p + 1)} \times \frac{1}{(100p + 1)} \times \frac{1}{(115p + 1)} \times \frac{1}{(117p + 1)}$$

Итог обработки данных в программном пакете RTD это две передаточные функции, разница которых определяет объект исследования (сгуститель).

Разработка модели процесса сгущения выполнена в следующей части данной главы.

2.2.3 MATLAB

Моделирование объекта исследования – сгустителя, было проведено в среде MATLAB (Simulink), выбор в пользу данного программного продукта был сделан

с учетом того, что стандартные инструменты MATLAB позволяют обрабатывать передаточные функции [104].

Радиальный сгуститель, используемый для сгущения медно-никелевого концентрата, представляет собой разность последовательных наборов передаточных функций, каждая из которых имеет собственную постоянную t .

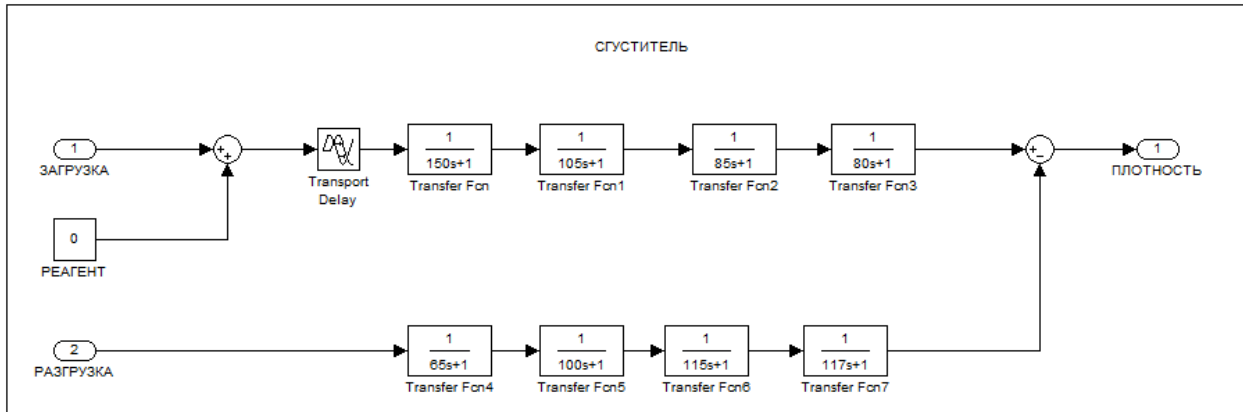


Рисунок 39 – Модель сгустителя. Нормированные значения

Представленная выше модель работает с нормированными значениями. Для перехода к инженерным величинам и обратно, разработаны два блока [104], первый преобразует разгрузку и загрузку из реальных значений в нормированные, второй преобразует плотность из нормированных значений в реальные (Рисунок 40).

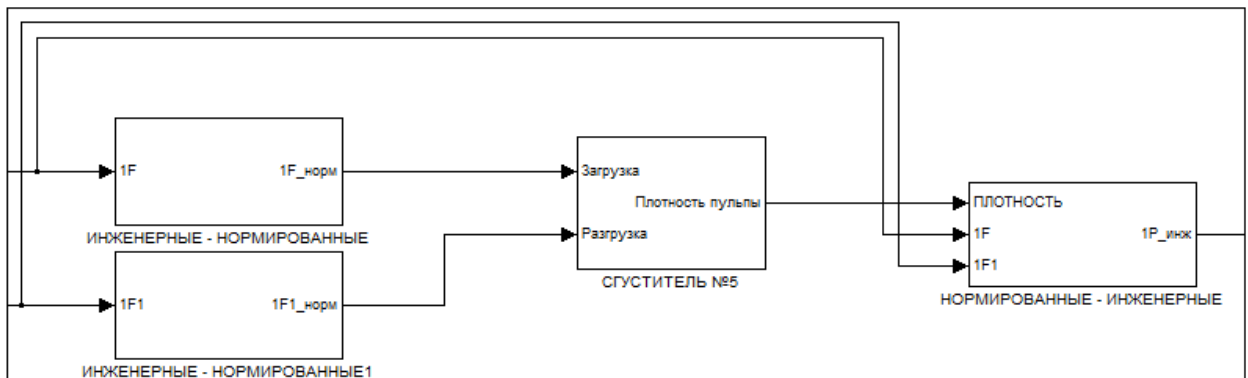


Рисунок 40 – Преобразование из реальных значений в нормированные.

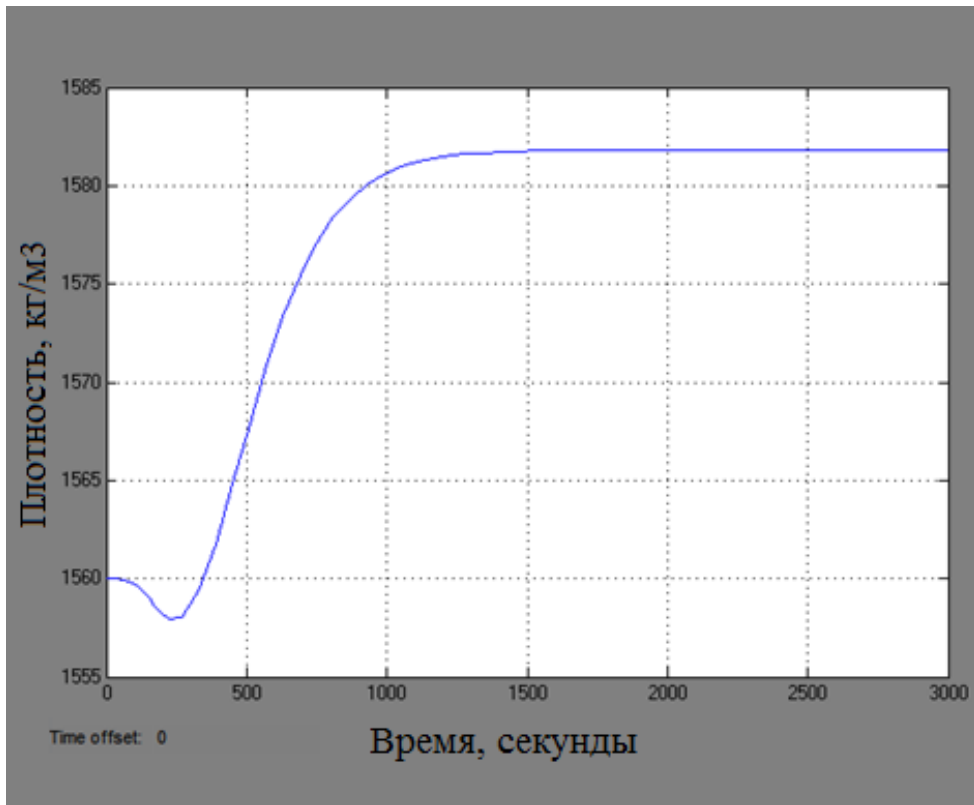


Рисунок 41 – Результаты работы модели. Загрузка = $370 \text{ м}^3/\text{ч}$, Разгрузка = $279 \text{ м}^3/\text{ч}$

На рисунке 41 представлены результаты работы модели сгустителя №5, стоит отметить, что при установленных значениях загрузки и разгрузки, значение плотности в первые 300 секунд имеет отрицательный скачок, после чего происходит увеличение значения. Это связано с тем, что разгрузка влияет на плотность с меньшим временем запаздывания, чем загрузка.

Для проверки адекватности модели было проведено сравнение результатов работы этой модели с архивными данными (Рисунок 42). Был выбран и загружен в среду пакета MATLAB - Workspace определенный отрезок архивных данных. Далее с помощью блока «From Workspace» эти данные были поданы на вход блока объекта сгустителя.

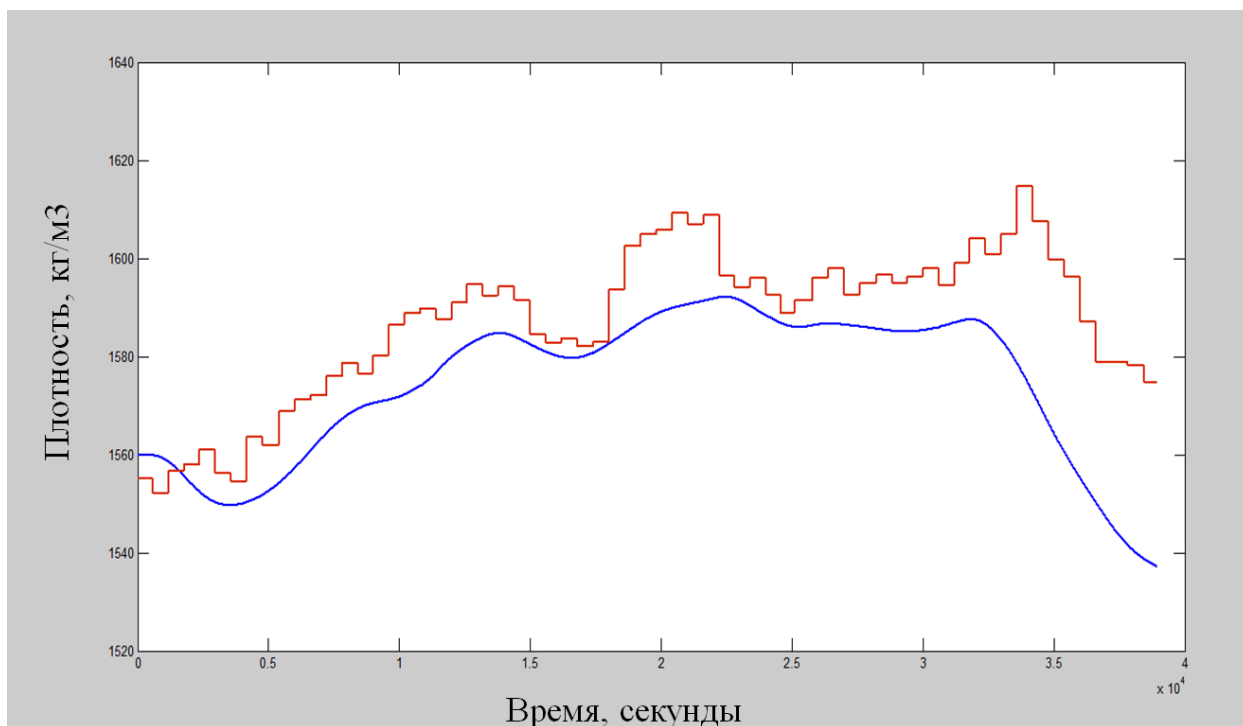


Рисунок 42 – Сравнительный анализ модели и производственных данных

Рисунок 42 показывает высокую сходимость расчетных значений и архивных данных, что позволяет в дальнейшем использовать эту модель для разработки систем управления процессом сгущения медно-никелевого концентрата.

Также была проведена оценка адекватности разработанной модели по критерию Фишера. Количество опытов – 245, число степеней свободы $f_1 = 2$, $f_2 = 243$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,94$. $F_{эксн} = 1903,5 > F_{табл}$.

Разработанная математическая модель описывает один сгустителя, но в процессе сгущения медно-никелевого концентрата участвует четыре сгустителя и одна распределительная коробка. Для реализации полного аппаратного соответствия, модели сгустителей были объединены параллельно, а с входом каждой из них соединен выход модели пульподелительной коробки, представляющей собой дифференциальное уравнение изменения уровня во времени.

На рисунке 43 представлена модель передела сгущения в среде MATLAB (Simulink) [40].

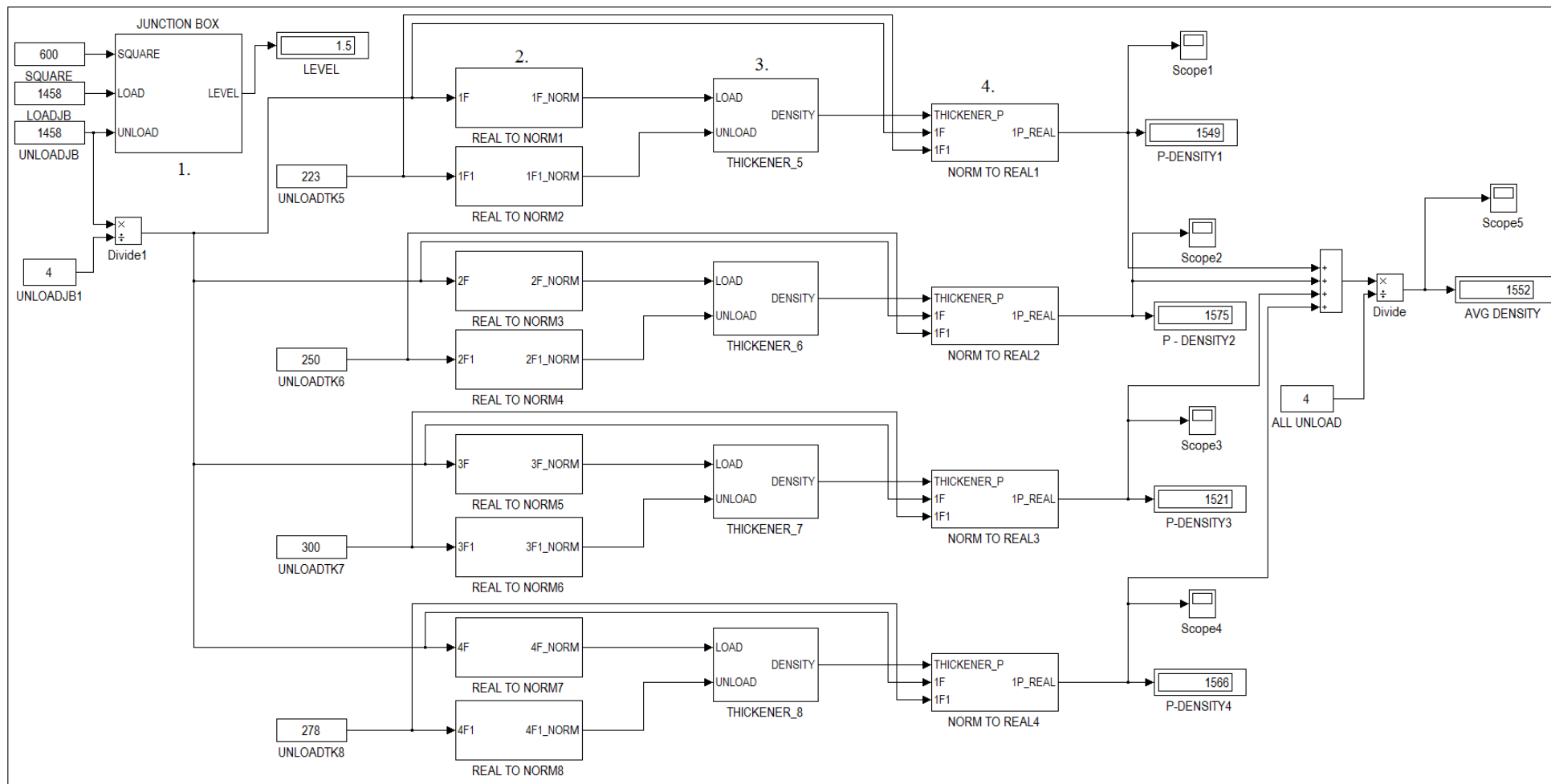


Рисунок 43 – Модель передела сгущения. MATLAB (Simulink)

где 1 – блок пульподелительной коробки, 2 – блоки преобразования инженерных значений в нормированные, 3 – блоки сгустителя, 4 – блоки преобразования нормированных значений в инженерные

2.3 Разработка системы автоматизации

2.3.1 Разработка системы автоматизации в среде MatLab (Simulink)

Объектом автоматизированного управления является передел сгущения медно-никелевого концентрата, который является хвостами основной медной флотации обогатительной фабрики. Питание для операции поступает в пульподелительную коробку, откуда происходит распределение пульпы на четыре потока для каждого из сгустителей. Подача производится с помощью шланговых клапанов с пневмоприводами, а транспортировка пульпы к самой коробке выполняется самотеком и не регулируется. Содержание твердого в поступающей пульпе равняется 37%.

Операция сгущения медно-никелевого концентрата проводится в четырех параллельных сгустителях (№5, №6, №7, №8) с диаметром 50 метров, аппараты №5, №6, №7 имеют периферический привод граблин, аппарат №8 – центральный.

Принцип работы сгустителя следующий: питание подается в питающий колодец аппарата параллельно с подачей раствора флокулянта, далее пульпа, покинув колодец, движется вниз, после чего в радиальном направлении к краям сгустителя, при этом скорость ее движения постепенно уменьшается. По мере того как замедляется движение радиальных потоков все более мелкие частицы осаждаются в аппарате и в конце концов оседают в его донной части, уплотняя сгущенный продукт, который далее посредством граблин перемещается к центру сгустителя, откуда центробежными насосами откачивается в общий трубопровод. Чистый слив переливом поступает в кольцевой желоб.

Пульпа с разгрузки каждого сгустителя объединяется в общий трубопровод, откуда перемещается в операцию коллективной флотации, после которой отправляется на взвешенную плавку и получение штейна. Итоговое содержание твердого в разгрузке сгустителей составляет 48 %.

Слив используется в дальнейшем водообороте обогатительной фабрики.

Основным требованием к управлению процесса сгущения является поддержание требуемой плотности общей разгрузки передела сгущения, что

достигается посредством загрузки и разгрузки сгустителей, а также управлением дозировкой флокулянта.

Для дозировки флокулянта используется специализированная установка, которая состоит из бункера по хранению сухого флокулянта в виде порошка, шнекового дозатора, чана для приготовления флокулянта, смесительного устройства и дозатора. Установки также оснащены расходомерами по линии подачи флокулянта в сгуститель.

Установка дозирования флокулянта позволяет регулировать мутность осветленного слоя и состояние постели сгустителей. При этом раствор, как правило, однопроцентный разбавляется минимум в 50 раз перед его подачей в технологическое оборудование.

Для управления установкой, задается уставка по уровню постели, регулятор в свою очередь дает уставку на соотношение расхода флокулянта к тонне твердой фазы.

Основная функция системы автоматизации это поддержание стабильного значения выходной плотности передела сгущения для дальнейшего получения концентрата с постоянным содержанием меди и никеля.

В ходе обработки архивных данных передела сгущения были выделены следующие управляющие воздействия – разгрузка сгустителя, загрузка сгустителя [109].

Система автоматизации имеет следующие функции:

- Контроль работы и состояния оборудования (сгустители, клапана, насосы);
- Контроль уровня пульпы в распределительной коробке;
- Стабилизация плотности на заданном оператором уровне;
- Отслеживание аварийных и предупредительных ситуаций;
- Контроль объемного расхода сгустителей.

Управление загрузкой сгустителей происходит посредством клапанов с пневмоприводами, а именно выдачей дискретных сигналов «Открыть» -

«Закреть» на плату клапана. Пульпа подается из пульподелительной коробки в сгуститель через регулируемый клапан, расход пульпы контролируется расходомером, для его поддержания на уровне уставки изменяется положение клапана.

Работа клапанов помимо управления питанием сгустителей также поддерживает уровень в пульподелительной коробке.

Управление разгрузкой происходит посредством центробежных насосов, а именно регулировкой частоты частотного преобразователя. Расход пульпы меряется расходомером на разгрузке каждого сгустителя [73].

Пульпа после передела сгущения поступает в коллективную флотацию, для которой стабильная плотность на входе является главным условием для достижения необходимых технологических показателей всей фабрики, при этом колебания объемного расхода на входе во флотацию также оказывают значительное влияние на качественные показатели производственного процесса. Следовательно, система должна обеспечивать стабильный объемный расход пульпы в пределах заданной уставки по суммарной плотности.

Объемный расход на разгрузке измеряется расходомером и изменяется с помощью регулирования частоты работы электродвигателя, к которому подключен разгрузочный насос [73, 74].

Система автоматизации процесса сгущения медно-никелевого концентрата в сгустителях №5, №6, №7, №8 управляет следующими исполнительными механизмами:

- регулирующий клапан питания сгустителя №5;
- регулирующий клапан питания сгустителя №6;
- регулирующий клапан питания сгустителя №7;
- регулирующий клапан питания сгустителя №8;
- пульповой насос разгрузки сгустителя № 36, №36а;
- пульповой насос разгрузки сгустителя № 37, №37а;
- пульповой насос разгрузки сгустителя № 38, №38а;

- пульповый насос разгрузки сгустителя № 39, №39а;
- установка дозирования флокулянта.

Для управления каждым из сгустителей выбрана двухконтурная система (Рисунок 44). Процесс управления расходом флокулянта контролируется посредством датчика уровня постели, а плотность продукта сгущения регулируется насосами на разгрузке и клапанами на загрузке [71].

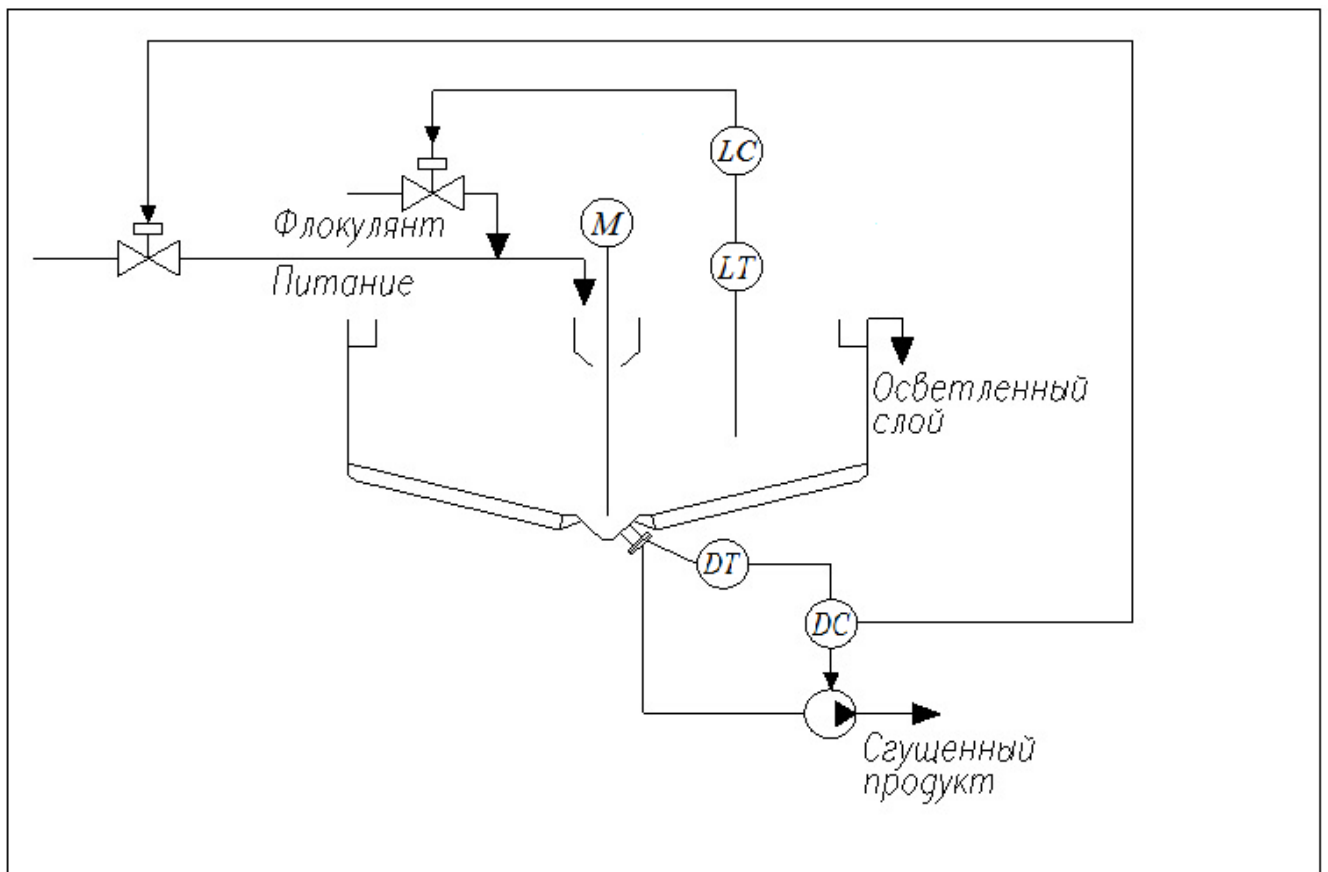


Рисунок 44 – Система управления сгустителем

Помимо автоматического управления аппаратами сгущения, в системе автоматизации учитывается еще один объект управления – пульподелительная коробка, управляемой величиной которой является уровень пульпы.

Для регулирования уровня в пульподелительной коробке выбрана одноконтурная система управления (Рисунок 45).

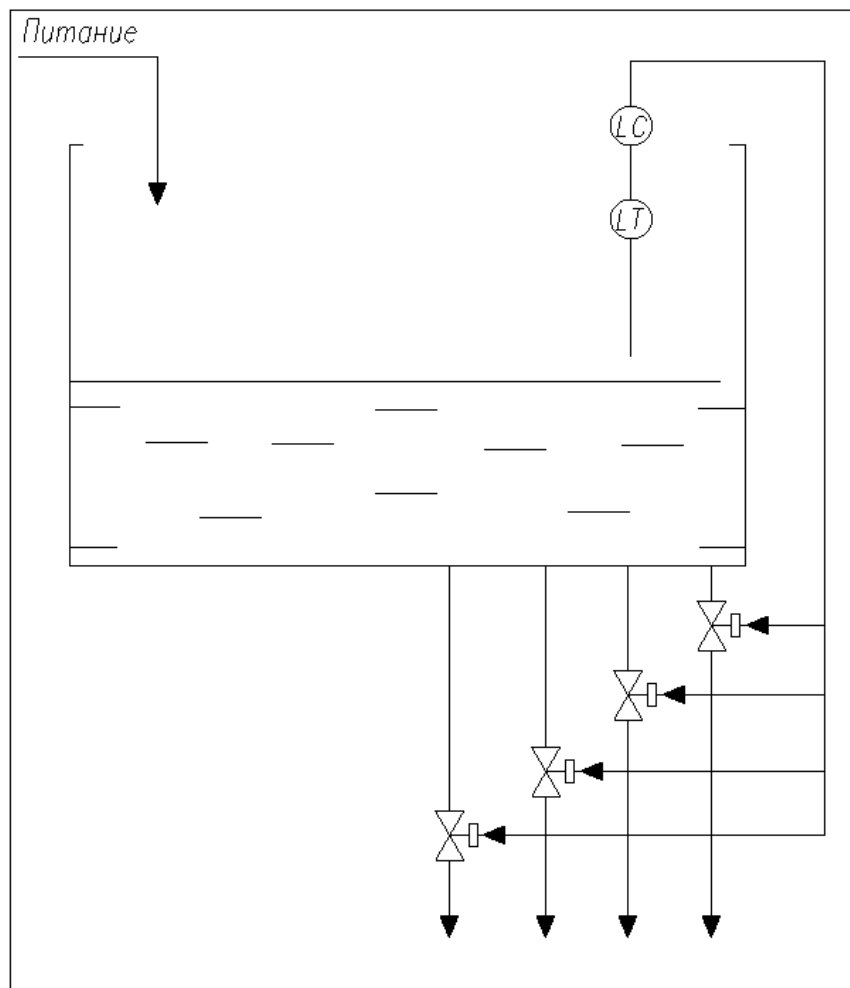


Рисунок 45 – Система управления уровнем в пульподелительной коробке

Таким образом, автоматизированная система управления передела сгущения, представляет собой совокупность четырех двухконтурных систем управления сгустителями №5, №6, №7, №8 и одноконтурной системой управления уровнем в пульподелительной коробке.

Ниже представлена разработка алгоритма работы системы управления.

В состав передела сгущения входят следующие объекты:

- Сгуститель радиальный с центральным приводом. Внутренний диаметр 50 м, площадь осаждения 1963 м^2 . 1 шт.;
- Сгуститель радиальный с периферическим приводом, Внутренний диаметр 50 м, площадь осаждения 1963 м^2 . 3 шт.;

- Распределительная коробка, площадь $S = 600 \text{ м}^2$ 1 шт;
- Откачивающие насосы. 4 шт;
- Регулируемые клапана. 4 шт.

В приложении А показана структурная схема передела сгущения.

Автоматизированная система выполняет следующие функции:

- Поддержание уровня в пульподелительной коробке;
- Управление общим объемом разгрузки сгустителей;
- Управление общей плотностью разгрузки сгустителей.

Каждая из функций задействует исполнительные механизмы передела сгущения, которые с момента запуска системы не могут управляться в ручном режиме.

Функция поддержания уровня в пульподелительной коробке. Пульподелительная коробка представляет собой бак, распределяющий питание пульпы на все сгустители. Поток пульпы в коробку является постоянным, поток пульпы из коробки происходит по четырем каналам, посредством клапанов на загрузке сгустителей. Средний уровень пульпы в коробке $L = 1,5$ метров, а плотность медно-никелевого концентрата $\rho = 1,70 \text{ т/м}^3$.

Для правильной работы функции, оператору необходимо задать уставку SP (Set Point) уровня пульпы в коробке, в противном случае уставка приравняется $SP = 1,5$ метров.

После задания уставки, система начинает регулировать положения клапанов (0-100%) с помощью дискретных регуляторов, выдающих импульсные сигналы на управление клапаном «Открыть», «Закрыть».

Регулировка загрузочных клапанов происходит по алгоритму, в соответствии с которым, загрузка происходит не в равных долях на каждый сгуститель, а по значению плотности на выходе из сгустителей. Сгуститель с большей плотностью получает меньшую загрузку, сгуститель с меньшей плотностью получает большую загрузку. Остальные получают загрузку пропорционально значению выходной плотности. Расчет распределения пульпы

происходит интервально каждые 10 минут. Изменение загрузки происходит шагами, не превышающими $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Функция управления общим объемом разгрузки передела сгущения. При работе данной функции, необходимо задать уставку по общему объемному расходу пульпы всех сгустителей. После задания уставки, система управляет частотой работы насосов на разгрузке, увеличивает или уменьшает значение расхода для каждого контура пропорционально плотности сгущенного продукта. Сравнение уставки объема и его реального значения происходит интервально каждые 10 минут. При увеличении или уменьшении уставки, изменение разгрузки сгустителей происходит также постепенно с шагом, не превышающим $10 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Функция управления общей плотностью передела сгущения позволяет задать уставку общей плотности после всех сгустителей. После задания уставки система воздействует на уставку общего объемного расхода так, чтобы суммарная плотность была равна уставке.

Ниже рассмотрен алгоритм работы каждой функции системы.

Алгоритм функции поддержания уровня в пульподелительной коробке (блок-схема приведена в приложении Б) выполняет расчет загрузки сгустителей каждые 10 минут:

1. Задание уставки уровня в пульподелительной коробке SP;
2. Сравнение уставки SP и уровня в коробке PV;
3. Если $SP < > PV$:
 - 3.1. Поиск разницы между SP и PV;
 - 3.2. Посредством ПИ регулятора выдается управления на общую разгрузку;
 - 3.3. Определение разницы между расходом загрузки (DF) в момент времени t и в момент времени t+1;
 - 3.4. Получение приращения общей загрузки $dDF = DF \div 20$;
 - 3.5. Вычисление максимальной плотности «MAX_P» между плотностями каждого сгустителя (P1,P2,P3,P4);

- 3.6. Определение разницы (DP1, DP2, DP3, DP4) между максимальным значением и плотностью каждого сгустителя (DP1, DP2, DP3, DP4);
- 3.7. Получение их суммы $SUM_DP = DP1+DP2+DP3+DP4$;
- 3.8. Нормировка DP1, DP2, DP3, DP4 посредством деления каждой разницы на их сумму;
- 3.9. Получение «положительного» приращения загрузки каждого клапана, умножением нормируемого значения разницы на шаг изменения загрузки. $PDF1$ ($PDF2$, $PDF3$, $PDF4$) = N_DP1 (N_DP2 , N_DP3 , N_DP4) \times 20. Число «20» является допустимым, регулируемым шагом;
- 3.10. Получение «положительного» приращение загрузки каждого клапана, умножением нормируемого значения разницы на количество приращения расхода загрузки. $SPDF1$ ($SPDF2$, $SPDF3$, $SPDF4$) = N_DP1 (N_DP2 , N_DP3 , N_DP4) \times dDF ;
- 3.11. Вычисление минимальной плотности «MIN_P» между плотностями каждого сгустителя ($P1,P2,P3,P4$);
- 3.12. Определение разницы (DP1, DP2, DP3, DP4) между минимальным значением и плотностью каждого сгустителя (DP1, DP2, DP3, DP4);
- 3.13. Получение их суммы $SUM_DP = DP1+DP2+DP3+DP4$;
- 3.14. Нормирование DP1, DP2, DP3, DP4 путем деления каждой разницы на их сумму;
- 3.15. Получение «отрицательного» приращения загрузки каждого клапана, умножением нормируемого значение разницы на шаг изменения загрузки. $NDF1$ ($PDF2$, $PDF3$, $PDF4$) = N_DP1 (N_DP2 , N_DP3 , N_DP4) \times 20. Число «20» является допустимым, регулируемым шагом;
- 3.16. Получение реального значения загрузки $RDF1$ ($RDF2$, $RDF3$, $RDF4$) = $PDF1$ ($PDF2$, $PDF3$, $PDF4$) – $NDF1$ ($NDF2$, $NDF3$, $NDF4$) + $SDF1$ ($SDF2$, $SDF3$, $SDF4$);
- 3.17. Переход к пункту 2;

4. Если $SP = PV$, выполняются последовательно пункты 3.5-3.9 и пункты 3.11-3.15:

4.1. Получение реального приращения загрузки $RDF1$ ($RDF2, RDF3, RDF4$) = $PDF1$ ($PDF2, PDF3, PDF4$) – $NDF1$ ($NDF2, NDF3, NDF4$);

4.2. Переход к пункту 2.

Алгоритм стабилизации общего объема пульпы на разгрузке (блок-схема представлена в приложении В) выполняет расчет разгрузки сгустителей каждые 10 минут:

1. Задание уставки общему объему разгрузки передела сгушения;
2. Сравнение уставки SP и величины общего объема разгрузки
3. Если $SP < > PV$:
 - 3.1. Вычисление разницы между уставкой и величиной общего объема;
 - 3.2. Определение допустимого шага приращения общей разгрузки dDF .
 $dDF = DF/10$;
 - 3.3. Вычисление максимальной плотности «MAX_P» между плотностями каждого сгустителя ($P1, P2, P3, P4$);
 - 3.4. Определение разницы ($DP1, DP2, DP3, DP4$) между максимальным значением и плотностью каждого сгустителя ($DP1, DP2, DP3, DP4$);
 - 3.5. Получение их суммы $SUM_DP = DP1+DP2+DP3+DP4$;
 - 3.6. Нормировка $DP1, DP2, DP3, DP4$ посредством деления каждой разницы на их сумму;
 - 3.7. Получение «положительного» приращения разгрузки каждого насоса $PDF1$, умножением нормированного значения каждого канала на 10. Допустимый и регулируемый шаг по изменению разгрузки каждого контура;
 - 3.8. Получение «положительного» приращения разгрузки каждого насоса по уставке объема $SPDF$, умножением нормированного значения каждого контура на dDF ;

- 3.9. Вычисление минимальной плотности «MIN_P» между плотностями каждого сгустителя (P1,P2,P3,P4);
- 3.10. Определение разницы (DP1, DP2, DP3, DP4) между минимальным значением и плотностью каждого сгустителя (DP1, DP2, DP3, DP4);
- 3.11. Получение их суммы $SUM_DP = DP1+DP2+DP3+DP4$;
- 3.12. Нормирование DP1, DP2, DP3, DP4 путем деления каждой разницы на их сумму;
- 3.13. Получение «негативного» приращения разгрузки каждого насоса NDF, умножением нормированного значения каждого контура на 10, допустимый и регулируемый шаг;
- 3.14. Получение реального приращения разгрузки каждого сгустителя. $RDF1(RDF2, RDF3, RDF4) = NDF1 (NDF2, NDF3, NDF4) - PDF1 (PDF2, PDF3, PDF4) + SPDF1 (SPDF2, SPDF3, SPDF4)$;
- 3.15. Переход к пункту 2;
4. Если $SP = PV$:
 - 4.1. Выполнение пунктов 3.3-3.7 и пунктов 3.9-3.13;
 - 4.2. Получение реального приращения разгрузки каждого сгустителя. $RDF1 (RDF2, RDF3, RDF4) = NDF1 (NDF2, NDF3, NDF4) - PDF1 (PDF2, PDF3, PDF4)$;
 - 4.3. Переход к пункту 2.

Алгоритм стабилизации общей плотности пульпы на разгрузке (блок-схема представлена в приложении Г):

1. Задание уставки общей плотности передела сгущения;
2. Сравнение уставки SP и величины плотности разгрузки;
3. $SP \lessgtr PV$:
 - 3.1. Вычисление разницы между уставкой и величиной плотности dP;
 - 3.2. Если $dP < 0$:
 - 3.2.1. Прибавление к уставке общего объемного расхода $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, минимальный, регулируемый шаг управления;

3.2.2. Переход к пункту 2;

3.3. Если $dP > 0$:

3.3.1. Вычитание из уставки общего объемного расхода $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, минимальный, регулируемый шаг управления;

3.3.2. Переход к пункту 2.

Автоматизированная система управления разгрузкой и загрузкой сгустителей, была реализована в среде MATLAB (Simulink) (Приложение Д), на созданной ранее модели передела сгущения и представляет собой две подсистемы: «AUTO_LOAD» (подсистема расчета питания на сгустители) и «AUTO_UNLOAD» (подсистема расчета разгрузки сгустителей) [40].

Подсистема расчета питания на сгустители содержит следующие параметры:

1. Входные: Плотность сгустителя №5,6,7,8;
2. Выходные: Приращение расхода питания сгустителей №5,6,7,8.

Рисунок 46 отдельно показывает работу блока распределения загрузки сгустителей. На вход приходят значения текущих плотностей каждого сгустителя. На выходе в блоках «Display» получение загрузки с приращением для каждого контура.

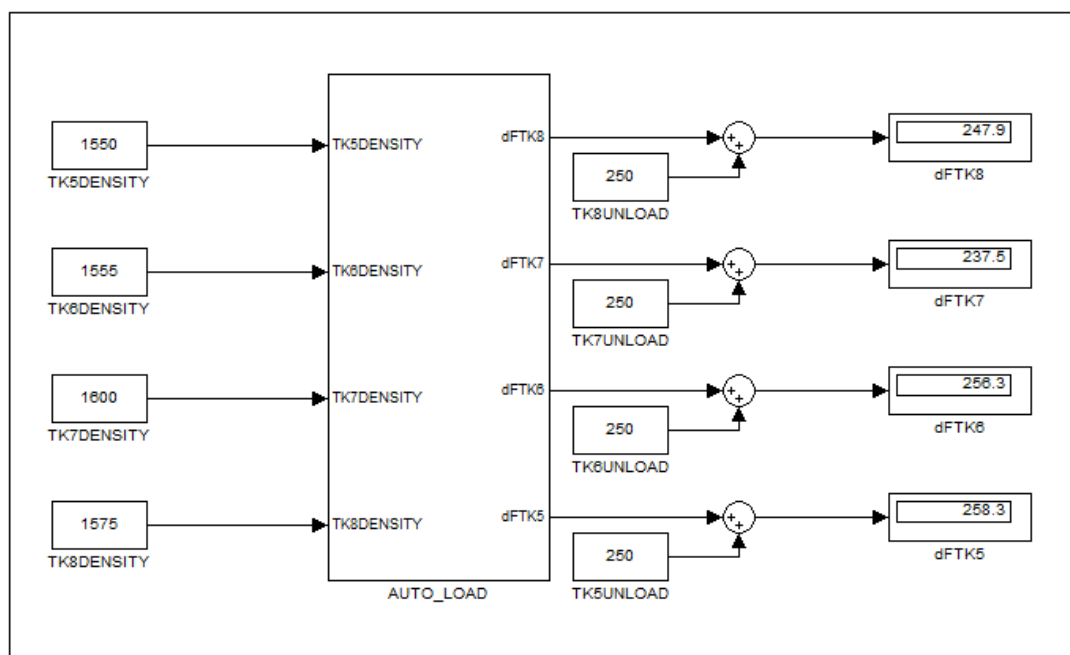


Рисунок 46 – Подсистема распределения загрузки

Подсистема расчета разгрузки сгустителей содержит следующие параметры:

1. Входные: Плотность сгустителя №5,6,7,8; Задание объемного расхода; Реальный объемный расход;
2. Выходные: Приращение расхода разгрузки сгустителей №5,6,7,8.

Рисунок 47 отдельно показывает работу блока распределения разгрузки сгустителей. На вход приходят значения текущих плотностей каждого сгустителя, а также общий объемный расход и разность $SP - PV$ (необходимые для симуляции). На выходе в блоках «Display» получение разгрузки с приращением для каждого контура. Для демонстрации, в среде MATLAB (Simulink) на вход блока распределения разгрузки входные данные в виде константных значений.

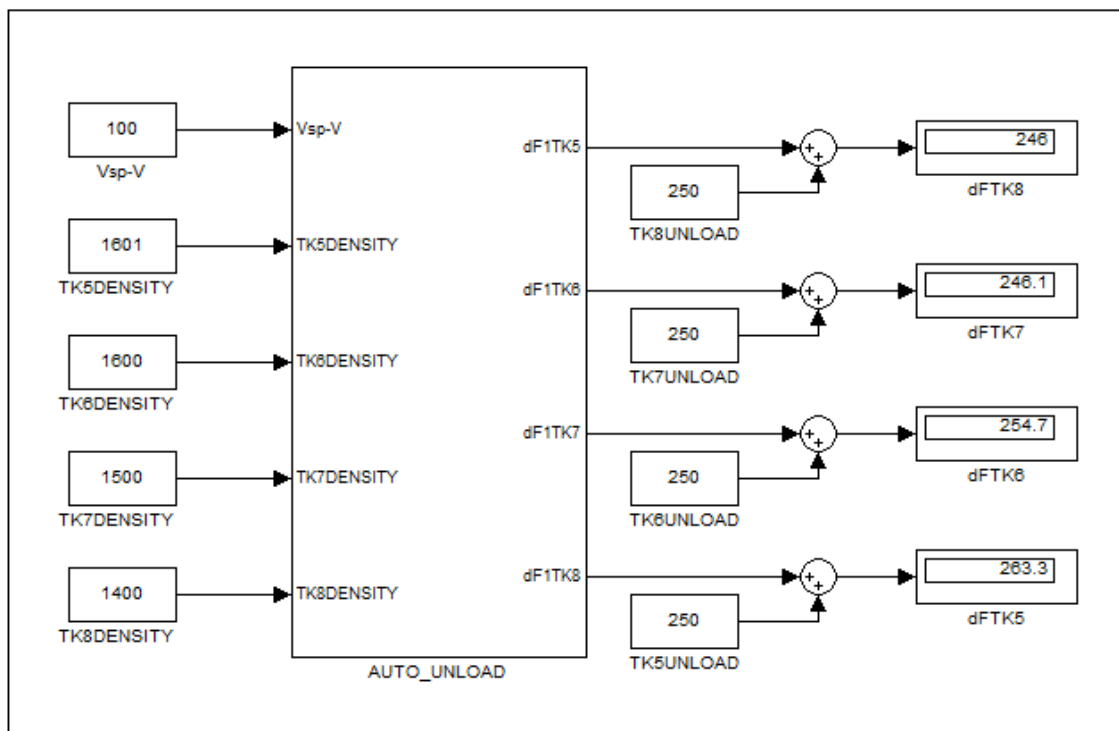


Рисунок 47 – Подсистема распределения разгрузки

Стабилизация общей плотности передела происходит с помощью дискретного регулятора, выходное воздействие которого меняет уставку общего объемного расхода (Рисунок 48):

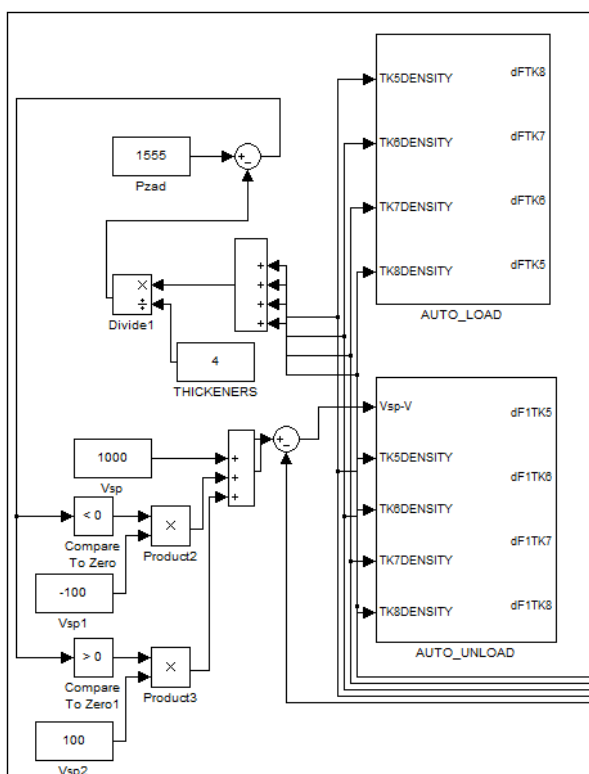


Рисунок 48 – Задание плотности всего передела сгущения

Ниже представлены результаты работы системы в виде графиков плотности по отношению к времени процесса. Отклик системы на управления и возмущение. Возмущением является ввод реагента в сгуститель. В виду того, что используется модель передела сгущения, алгоритм выполнения подсистем происходит непрерывно.

На рисунке 49 представлен сравнительный график плотностей каждого сгустителя, после использования функции распределения разгрузки. Своего равновесия система достигла на отметке 2700 секунд (45 минут).

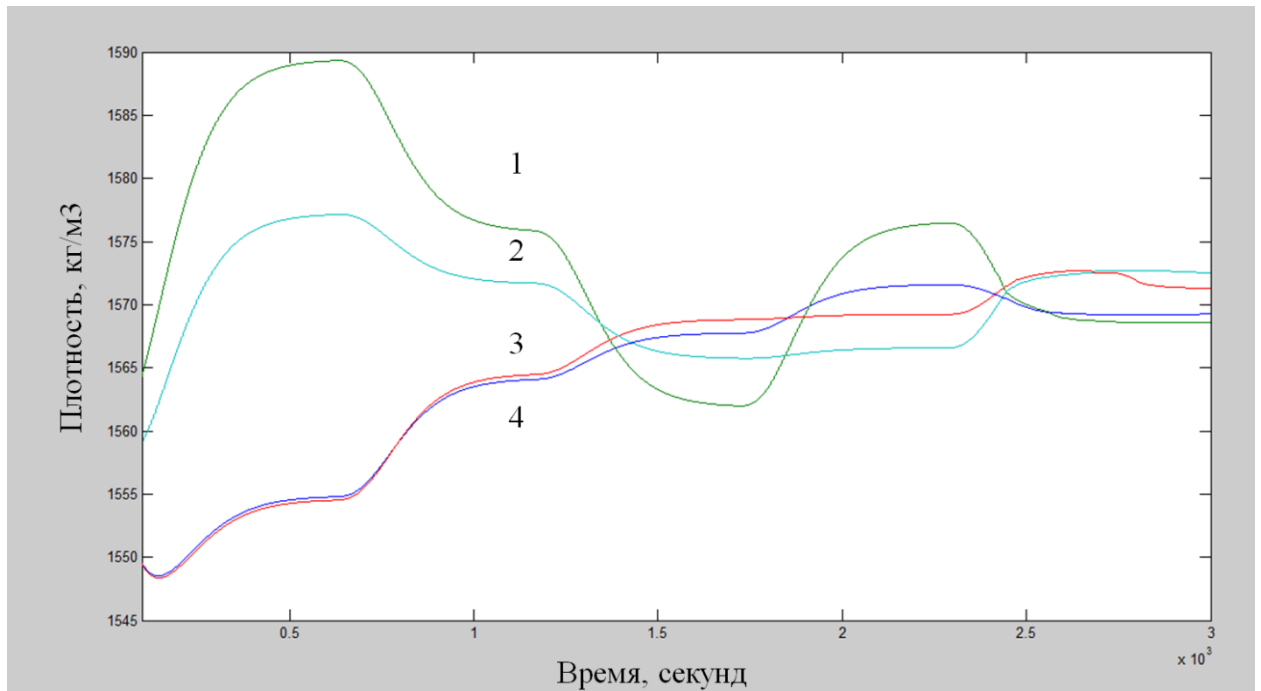


Рисунок 49 – Функция распределения загрузки

где 1– плотность сгустителя №5, 2 – плотность сгустителя №6, 3 – плотность сгустителя №7, 4 – плотность сгустителя №8

На рисунке 50 представлен график стабилизации объема разгрузки и усреднения плотностей. Алгоритм проверялся при увеличении уставки общего объема с 1000 м³/ч до 1200 м³/ч.

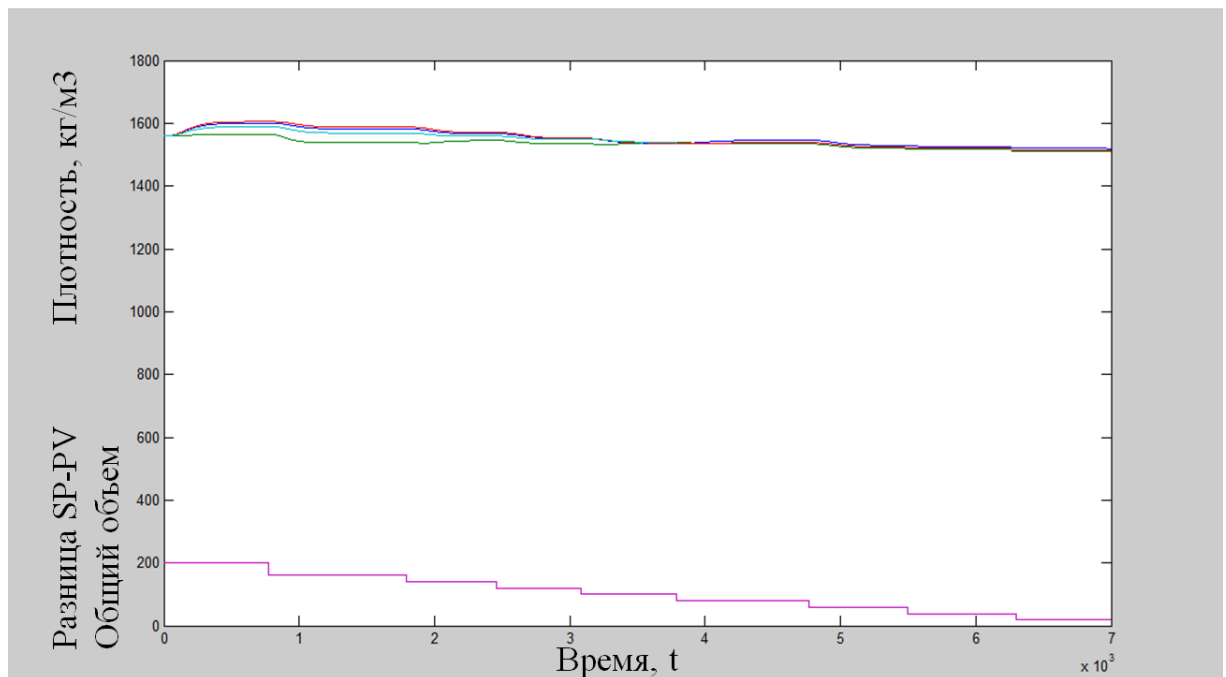


Рисунок 50 – Функция распределения разгрузки. Стабилизация объема

Рисунок 51 показывает работу системы при стабилизации выходной плотности передела сгущения. Заданная уставка по плотности равняется 1500 кг/м^3 . График работы системы показывает, что отклонение плотности от уставки не превышает $\pm 50 \text{ кг/м}^3$.

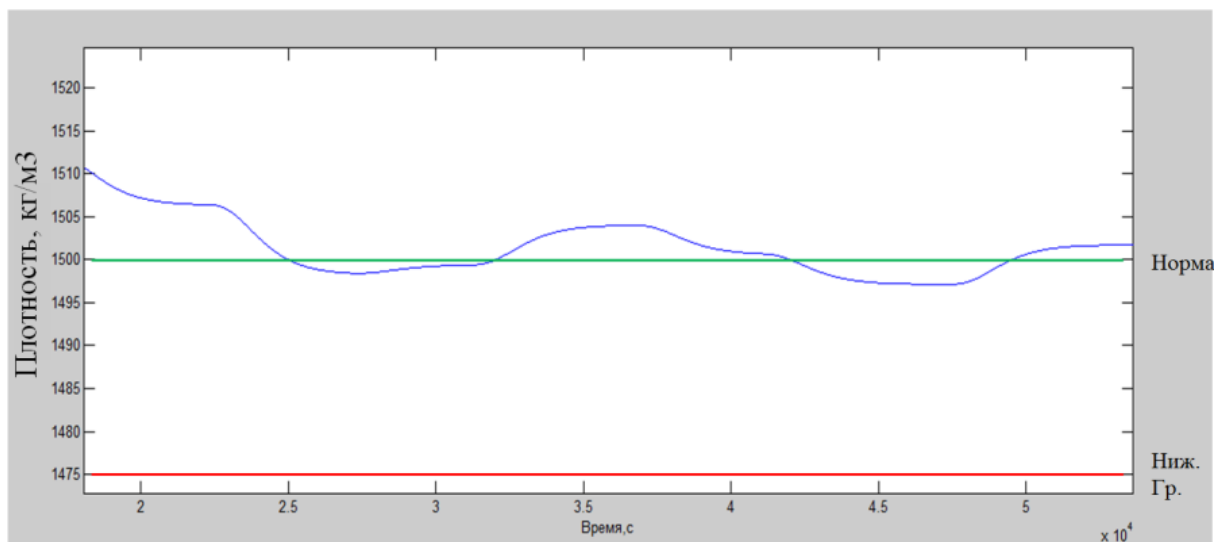


Рисунок 51 – Функция распределения разгрузки. Стабилизация плотности

Результаты работы автоматизированной системы управления процессом сгущения медно-никелевого концентрата представлены на рисунке 52. Для сравнения добавлены архивные значения плотности передела.

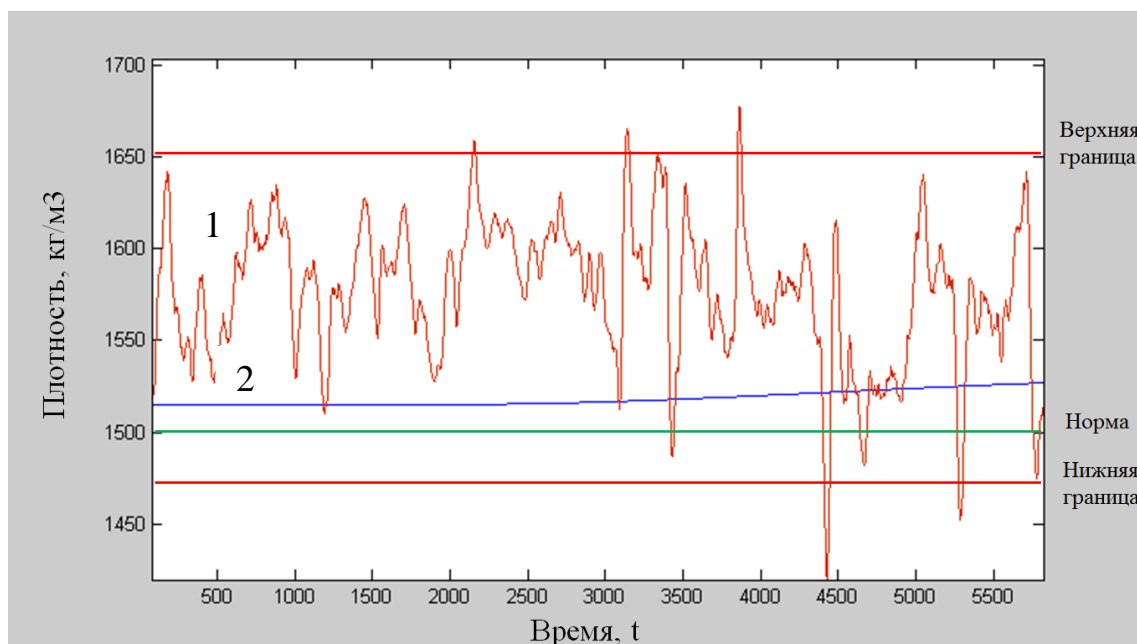


Рисунок 52 – Сравнение результатов работы системы и производственных данных
ПО ПЛОТНОСТИ

где 1 – производственные данные, 2 – данные работы автоматизированной системы управления

Из предоставленных выше графиков следует, что автоматизированная система параллельного управления разгрузкой и загрузкой значительно уменьшает колебания выходной плотности медно – никелевого концентрата, а значит, может использоваться в качестве действующей системы на реальном объекте.

2.3.2 Реализация системы автоматизации в производственном процессе

Разработка системы автоматизации была проведена в среде MATLAB (Simulink), однако ее реализацию для внедрения в производственный процесс необходимо проводить на основе специализированных программных решений, а также с использованием контрольно-измерительных приборов. В настоящей диссертационной работе для управления процессом сгущения медно-никелевого концентрата были выбраны продукты компании GE Intelligent Platforms. Для управления контрольно-измерительными приборами нижнего уровня выбран ПЛК PAC System RX3i от компании GE, контроллер обеспечивает следующие функции:

- Дискретное управление клапанами питания сгустителей;
- Аналоговое управление частотными преобразователями разгрузочных насосов;
- Получение информации с аналоговых датчиков 4 – 20 мА и дальнейшее ее преобразование к инженерным величинам;
- Получение информации с дискретных датчиков;
- Генерирование тревог производственного процесса;
- Связь со SCADA системой.

Для отображения информации о ходе процесса сгущения используется SCADA системы Proficy Simplicity от GE, которая обеспечивает следующие функции:

- Отображение мнемосхемы процесса в виде потоков и аппаратов;
- Отображение значений измеряемых величин процесса;
- Доступ оператора к удаленному управлению исполнительными механизмами;
- Отображение аварийных и предупредительных сигналов;
- Архивирование данных производственного процесса в БД.

На рисунке 53 представлена схема контрольно технических средств разработанной системы автоматизации.

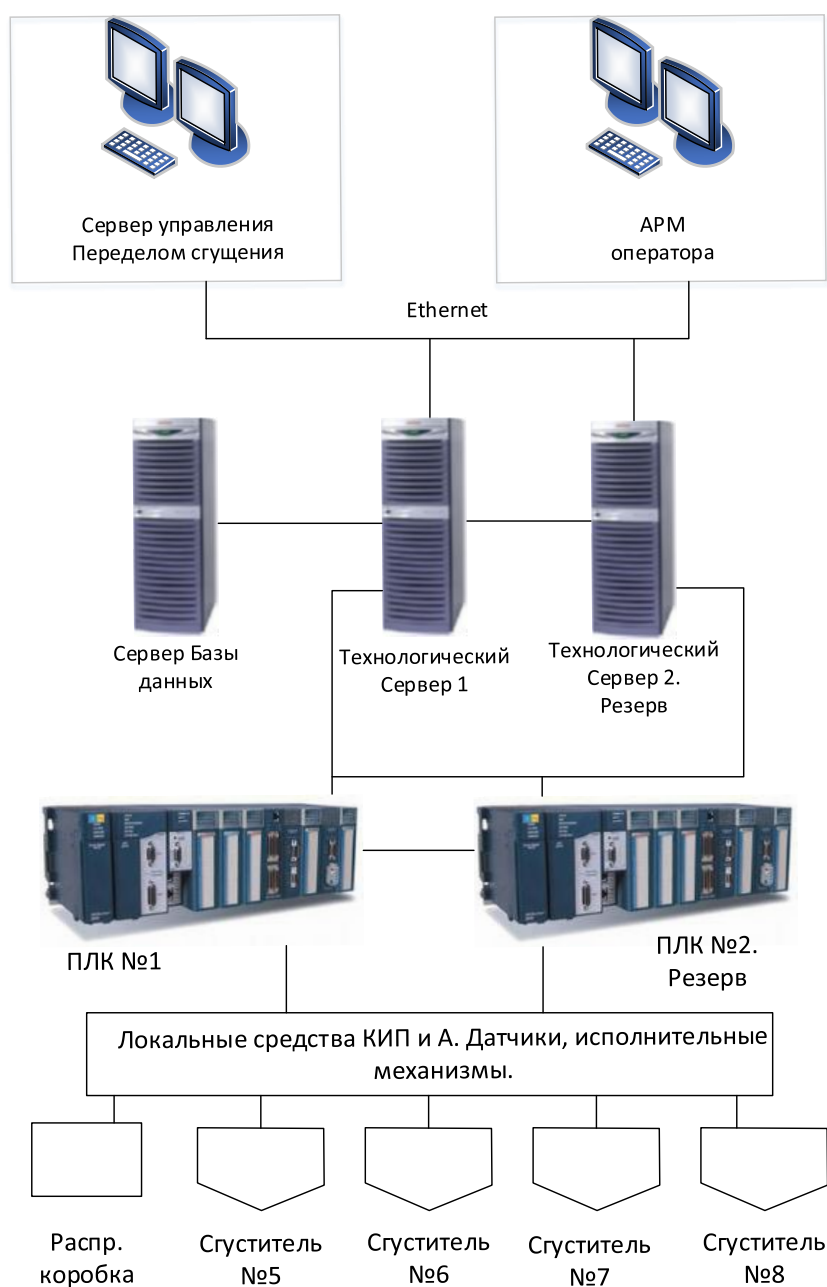


Рисунок 53 – Структурная схема КТС системы управления

На существующем объекте используются следующие локальные средства КИП и А [73, 74]:

- Уровнемеры (уровень в пульподелительной коробке, уровень в сгустителях);
- Датчики массы постели сгустителей;
- Система контроля постели сгустителя;
- Объемные расходомеры на сливе сгустителей;
- Объемные расходомеры для загрузки сгустителей;
- Погружные зонды для регистрации мутности слива;
- Плотномеры (плотность на разгрузке сгустителей).

В качестве уровнемеров используются ультразвуковые приборы с датчиком и электроникой, способной выполнять простейшие расчеты, способен измерять уровень жидкости и сыпучих материалов.

Принцип действия данного устройства состоит в том, что устройство отправляет ультразвуковой импульс до материала и отсчитывает время, его возвращения. Токовый сигнал датчика в диапазоне 4-20 мА подается на модуль аналогового ввода ПЛК. Диапазон измерения в инженерных величинах составляет 0,25 – 5 метров с точностью до 0,25 % от диапазона [71].

Температурные ограничения для использования такого датчика составляют -40 – 60°С.

Регистрация количества твердого на разгрузке сгустителей происходит посредством измерения гидростатического давления, для измерения которого используют преобразователи JUMO dTRANS p02 CERAMIK. Токовый сигнал, подаваемый на модуль аналогового ввода в ПЛК, находится в диапазоне 4-20 мА [71].

В качестве системы индикации состояния постели сгустителя с погружными ультразвуковыми преобразователями используется система SONDAR 3000, которая позволяет контролировать границу между твердой и жидкой фазой.

Датчик устанавливается на подвижном мосту, передача информации происходит с помощью последовательного порта RS232 или RS485.

Объемный расход разгрузки измеряется посредством расходомера OPTIFLUX 4300W, который является электромагнитным расходомером и имеет диапазон измерения скорости потока в пределах 0,3-12 м/с. Точность прибора $\pm 0,15\%$ от измеренного значения ± 1 мм/сек.

Расход питания сгустителей контролируется магнитоиндукционным расходомером для труб с частичным заполнением TIDAFLUX 4110PF. Данное устройство имеет встроенную систему емкостного измерения уровня. Измерение остается точным даже при турбулентных потоках. Диапазон измерения скорости потока в пределах 0,3-12 м, выходной токовый сигнал 4-20мА или 0-20мА. Точность прибора при частично заполненной трубе – $V \geq 1\text{ м/с} < 1\%$ от полной шкалы, при полностью заполненной трубе – $V < 1\text{ м/с} < 1\%$ измеренного значения ± 5 мм/сек.

Для контроля мутности слива используется система из погружных зондов и вторичных преобразователей. Погружные зонды производят измерение в среде, после чего обработка сигнала происходит во вторичном преобразователе, откуда стандартный токовый сигнал 4-20 мА отправляется в АСУТП [71].

Само по себе измерение мутности происходит на основе нефелометрического принципа, а именно регистрации величины рассеивания инфракрасного излучения твердыми частицами пульпы под углом 90 градусов. Измеряемый диапазон зондов 0,0001 - 400 г/л с точностью 0,001 мг/л – 0,1 г/л.

Плотность пульпы контролируется плотномером ИПБ-1К на основе изотопа натрия с низкой интенсивностью. Данное устройство имеет диапазон измерения плотности пульпы в пределах 600-2200 кг/м³, с выходным токовым сигналом 4-20 мА. Предел абсолютной погрешности данного прибора составляет 6,0 кг/м³.

Для управления контрольно – измерительными приборами был выбран программируемый логический контроллер PAC System RX3i.

Для объединения модулей, блока питания и основного центрального процессорного устройства в рабочую станцию, используется универсальная базовая плата IC695CHS016, данная плата поддерживает установку модулей с шинами PCI и последовательными шинами. Для управления переделом сгущения ввиду большего быстродействия были выбраны модули с шиной PCI. Количество слотов базы 16, ее размер 601,98x141,5x147,32 мм.

В качестве процессора был выбран модуль IC695CPE310, выполненный на базе микропроцессора Intel Atom 1.1 ГГц с 10 мегабайтами встроенной памяти. Связь с верхним уровнем серверами GE Proficy Simplicity происходит посредством Ethernet порта RJ45 100 Mb/Sec. Процессор поддерживает все языки стандарта IEC 61131.3, а также программирование на языке Си.

Для обеспечения энергией базовой платы и модулей, используется блок питания IC695PSD140. Мощность данного БП составляет 40 Вт, входное напряжение 24 В постоянного тока.

Для сбора информации с аналоговых датчиков выбран модуль IC694ALG616. Количество каналов модуля – 16, диапазоны входных сигналов по току – «0-20 мА», «4-20 мА», «+/-20мА»; по напряжению – «+/-10В», «0-10В», «+/-5В», «0-5В», «1-5В». Точность измерения – 0,2% от диапазона.

Контроль состояния оборудования и других дискретных значений будет выполняться модулем IC694MDL660 с 32 каналами.

Для формирования сигналов дискретного вывода выбран 32 канальный модуль IC694MDL754.

Управление электродвигателями насосов на разгрузке происходит с помощью протокола MODBUS RTU по RS485 через модуль IC695CMM004.

В данной главе было рассмотрено использование статистических средств при разработке автоматизированной системы управления на примере процесса сгущения медно-никелевого концентрата.

Моделирование процесса проводилось двумя способами в двух программных пакетах. Первый способ – разработка модели в среде Proficy

Troubleshooter от компании GE IP, второй способ – разработка модели в среде RTD и MatLab. Оба подхода показывают высокий процент сходимости с архивными данными, однако использование Proficy Troubleshooter значительно упрощает разработку модели, а также позволяет избежать ошибок при расчетах.

Также использование Proficy Troubleshooter представляет высокий интерес в сфере обработки данных и извлечения из них экспертных знаний. Производственный архив посредством программного продукта от GE способен указать множество «узких» мест процесса сгущения, а также предоставить способы по их решению либо в качестве советчика оператора, либо отправляя команды в ПЛК.

С помощью Proficy Troubleshooter были выбраны влияющие на плотность разгрузки факторы и найден вид этих взаимосвязей.

Также в этой главе была разработана система автоматизированного управления процессом сгущения медно-никелевого концентрата с помощью параллельного управления разгрузкой и загрузкой сгустителей. Используемый в ее основе алгоритм управления позволяет уменьшить колебания средней плотности медно-никелевого концентрата передела сгущения до $\pm 0,05 \text{ т/м}^3$, что в дальнейшем определяет получение концентрата с высоким содержанием никеля, который поступает переработку в печи взвешенной плавки.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛОТНОСТИ СГУЩЕНИЯ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ШТАБА СОТРУДНИКОВ

3.1 Разработка программного продукта по стабилизации плотности передела сгущения медно-никелевого концентрата

В предыдущей главе была рассмотрена разработка системы автоматизации процесса сгущения медно-никелевого концентрата, а также алгоритм управления разгрузкой и загрузкой сгустителей. Как было указано выше, реализацию этого алгоритма и системы предполагается выполнять на основе продуктов GE. Однако, в ходе работы над настоящей диссертацией, был разработан универсальный программный продукт, позволяющий не привязывать выполнение алгоритма к какому либо производителю программного обеспечения (GE, Siemens, Rockwell Automation). Данный продукт распространяется как отдельный .exe файл и представляет собой приложение, позволяющее стабилизировать плотность процесса сгущения.

Автоматизированная система параллельного управления загрузкой и разгрузкой сгустителей представляет собой алгоритм, автоматически регулирующий плотность медно-никелевого концентрата с помощью клапанов на загрузке и насосов на разгрузке каждого из сгустителей. Универсальность данной системы состоит в том, что для ее внедрения нет требований по установке дополнительного оборудования на производство. Система поставляется в программном виде. Использование программного пакета возможно на любом производстве, где применяется процесс сгущения, а также требуется стабилизация плотности выходного продукта.

Функции программного пакета:

- Управление загрузкой и разгрузкой сгустителей системы (передача и прием информации посредством OPC технологии или обработка специализированным драйвером для связи со сторонними ПЛК);
- Контроль объемного расхода пульпы из системы;
- Стабилизация плотности выходного концентрата.

Универсальность достигается следующими возможностями программного пакета:

- Количество сгустителей масштабируется от 1 до 10;
- Связь с сервером проекта по технологии OPC;
- Возможность настройки границ основных показателей (Расход на загрузке и разгрузке, плотность пульпы).

На рисунке 54 представлена блок-схема связи разработанного программного продукта и производственных продуктов.

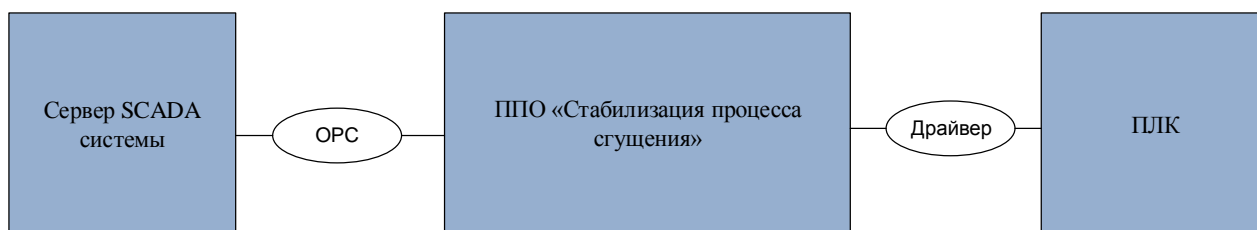


Рисунок 54 – Блок-схема связи ППО «Стабилизация процесса сгущения» и стандартных производственных продуктов

Существует также требование для равномерной и адекватной работы системы, для стабилизации выходной плотности передела сгущения необходимо стабилизировать подачу реагента в сгустители.

Прикладное программное обеспечение «Стабилизация процесса сгущения» разработано в среде Microsoft Visual Studio на языке программирования VB.Net.

Ниже представлены основные экраны программного продукта.

Настройки

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СГУЩЕНИЯ
Для запуска системы укажите необходимые настройки

Введите количество аппаратов:	<input type="text" value="4"/>	шт.	Введите имя оператора:	<input type="text" value="Николаев А.Н."/>			
Введите диаметр аппарата:	<input type="text" value="50"/>	м	Укажите дату:	<input type="text" value="20 февраля 2017 г."/>			
Введите высоту пульпо- делительной коробки	<input type="text" value="5"/>	м	Выберите тип связи:	<input type="text" value="OPC Server"/>			
Введите площадь пульпо- делительной коробки	<input type="text" value="600"/>	м					
Введите границы частоты для насоса разгрузки:	Мин <input type="text" value="100"/>	Гц	Макс <input type="text" value="20000"/>	Гц			
Введите допустимые границы для загрузки:	Мин <input type="text" value="300"/>	м3/ч	Макс <input type="text" value="415"/>	м3/ч			
Введите допустимые границы для разгрузки:	Мин <input type="text" value="200"/>	м3/ч	Макс <input type="text" value="350"/>	м3/ч			
			Введите границы плотности разгрузки для сгустителей:	Мин <input type="text" value="1.38"/>	кг/м3	Макс <input type="text" value="1.68"/>	кг/м3
			Введите границы содержания твердого для сгустителей:	Мин <input type="text" value="65"/>	%	Макс <input type="text" value="85"/>	%

Ок Отмена Помощь

Рисунок 55 – Настройки системы стабилизации процесса сгущения

На рисунке 55 представлен экран, позволяющий ввести различные настройки системы стабилизации, такие как: количество аппаратов (от 1 – 10 штук), диаметр аппаратов, размеры пульподелительной коробки, границы по управлению частотой частотного преобразователя, границы инженерных величин загрузки и разгрузки сгустителя, имя оператора, дата, тип связи (OPC Server, Драйвер связи для ПЛК).

Экран настройки появляется при запуске программы, перед началом работы, так же может быть вызван посредством кнопки «Настройки» с основного экрана.

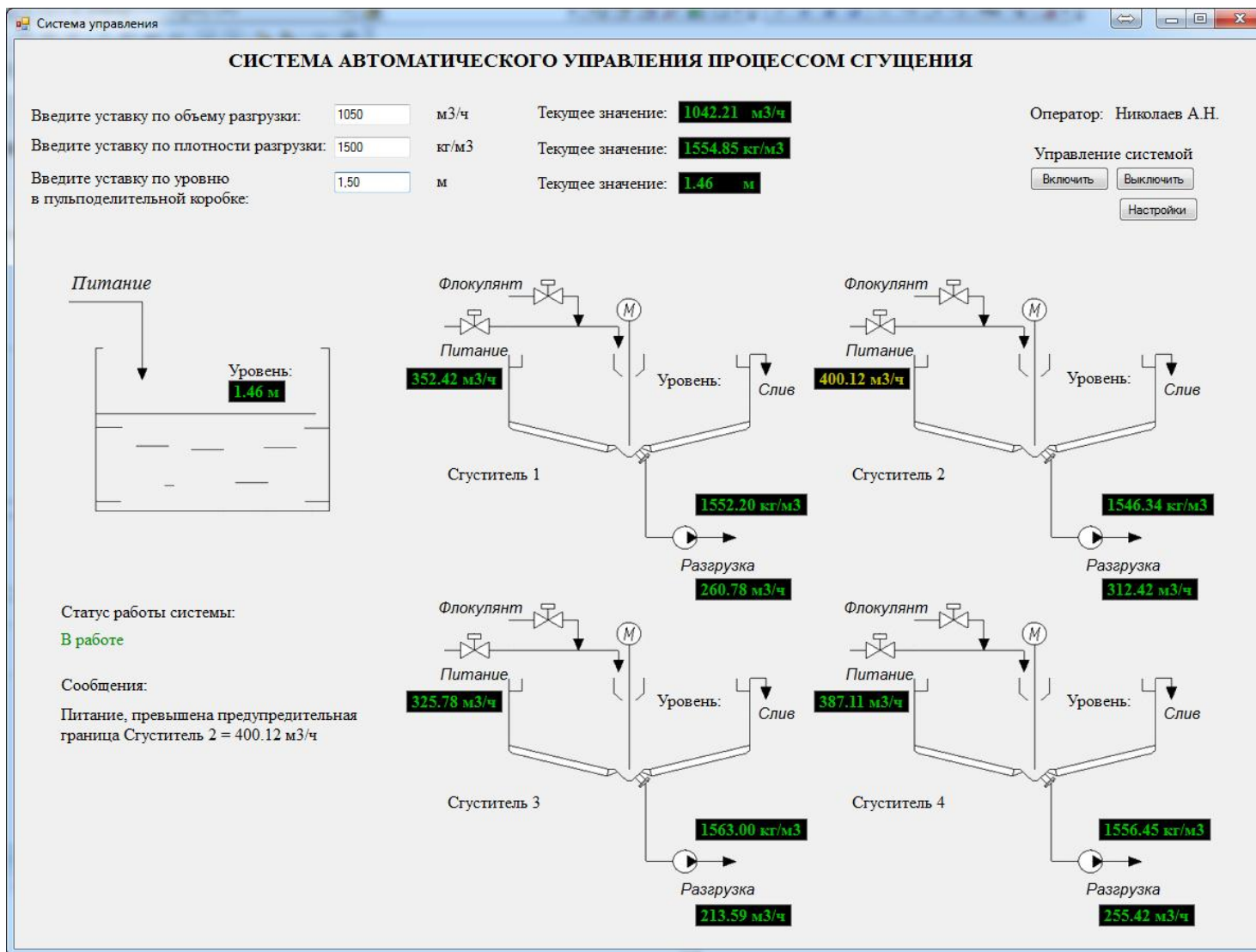


Рисунок 56 – Основной экран программного продукта «Система автоматического управления процессом сгущения»

На рисунке 56 представлен основной экран программного продукта по стабилизации процесса сгущения. В ходе диссертационной работы для связи с программным продуктом использовалась модель, созданная ранее в пакете MatLab (Simulink).

На основной экран программного пакета выведены следующие данные: информация по работе сгустителей (разгрузка – м³/ч, загрузка – м³/ч, плотность – кг/м³), уровень в пульподелительной коробке, уставки целевых величин и кнопки для управления системой стабилизации.

На рисунке 57 показаны элементы, позволяющие вводить уставки основных величин, справа от которых выведены текущие значения этих величин.

Введите уставку по объему разгрузки:	<input type="text" value="1050"/>	м ³ /ч	Текущее значение:	1042.21 м³/ч
Введите уставку по плотности разгрузки:	<input type="text" value="1500"/>	кг/м ³	Текущее значение:	1554.85 кг/м³
Введите уставку по уровню в пульподелительной коробке:	<input type="text" value="1.50"/>	м	Текущее значение:	1.46 м

Рисунок 57 – Управление системой стабилизации

Запуск и останов системы стабилизации возможен с помощью специализированных кнопок «Включить» и «Выключить», кнопка «Настройки» позволяет открыть экран настроек системы:

Оператор: Николаев А.Н.
Управление системой
<input type="button" value="Включить"/> <input type="button" value="Выключить"/>
<input type="button" value="Настройки"/>

Рисунок 58 – Кнопки управления системой

Статус системы стабилизации отображается в левом нижнем углу главного экрана, где также расположены аварийные и предупредительные сообщения по основным параметрам.

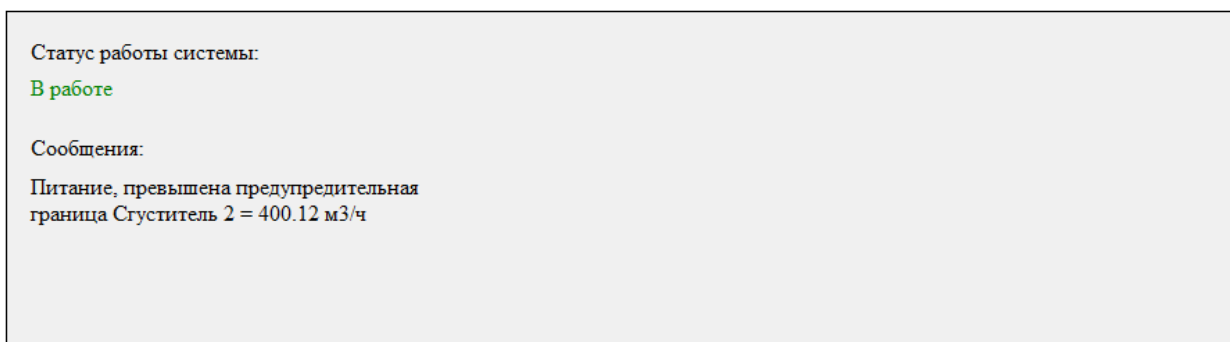


Рисунок 59 – Статус системы стабилизации и панель вывода аварийных и предупредительных сообщений

Статус работы системы может принимать следующие значения:

- «В работе» - система находится в рабочем состоянии и нормально функционирует;
- «Останов» - система остановлена в штатном режиме;
- «Авария» - система остановлена в аварийном режим, когда один из параметров выходит из строя;
- «Отсутствие связи» - отсутствует связь с ПЛК.

Отображение аналоговых сигналов представлено в следующем цветовом исполнении:

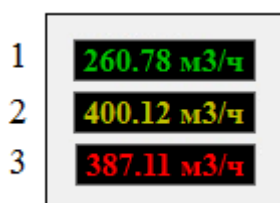


Рисунок 60 – Цветовое отображение аналоговых сигналов
 где 1 – нормальное состояние, 2 – предупредительная граница, 3 – аварийная граница

Основной функционал программного пакета «Система автоматического управления процессом сгущения»:

- Автоматическое управления процессом сгущения посредством разгрузки и загрузки пульпы;
- Управление объемным расходом пульпы всего передела сгущения;
- Стабилизация и управление общей плотностью передела сгущения;

- Аварийная сигнализация по аналоговым значениям и оборудования;

Как было сказано выше, при запуске .exe файла программного пакета, оператору предоставляется возможность ввести настройки ведения процесса (Рисунок 55), после нажатия кнопки «ОК» окно настроек закрывается и автоматически открывается главное окно системы управления.

При работе с программным пакетом в главном окне (Рисунок 56) оператор должен задать уставки по целевым параметрам системы, общий объем разгрузки, общая плотность разгрузки и уровень в пульподелительной коробке.

После задания всех уставок оператор может включить систему в работу с помощью кнопки «Включить». После запуска, системы с помощью клапанов на загрузке, а также насосов на разгрузке, поддерживается значение введенных уставок в ходе процесса сгущения. Описание алгоритма работы программы управления представлено в главе 2 части 3 данной диссертационной работы и реализовано на языке VB.Net в среде Microsoft Visual Studio.

В случае если один из параметров сгустителя пересекает введенные границы, то на экране высвечивается аварийное сообщение, а сгуститель выключается из расчета алгоритма в программном продукте.

Также, если плотность одного из сгустителей или содержание твердого становится меньше или больше введенной границы, после аварийного сообщения сгуститель выводится из расчета, а «местная» АСУТП выполняет свои директивы на случай аварийных ситуаций.

3.2 Тренажер для симуляции работы сгустителя

В предыдущей главе диссертационной работы, была получена модель процесса сгущения. Эта модель была реализована в среде Proficy Architect (Proficy CSense). С помощью технологии OPC данные с модели, а также ее управления передается в SCADA систему GE Proficy SIMPLICITY 9.5 [78].

Тренажер представляет собой проект в SCADA системе, с экраном оператора передела сгущения, модель Proficy Architect и базу данных SQL Server «Thickener.dbo».

В алгоритме работы тренажера предусмотрены несколько ситуаций, который прорабатываются во времени [86]:

1. Отказ работы насоса разгрузки одного из сгустителей (сгуститель выбирается случайным образом);
2. Задание на повышение плотности в сгустителе (сгуститель выбирается случайным образом);
3. Задание на понижение плотности в сгустителе (сгуститель выбирается случайным образом);
4. Задание на общий объем разгрузки с поддержанием плотности (Уставка выбирается случайно между 900 – 1300 м³/ч);
5. Отказ работы аналогового датчика плотности (сгуститель выбирается случайным образом);
6. Отказ работы клапана (сгуститель выбирается случайным образом);
7. Работа с автоматической системой разгрузки и загрузки сгустителей (задание уставки уровня, плотности, объема);
8. Периодическое возмущение по сливу сгустителя (сгуститель выбирается случайным образом);
9. Периодическое возмущение по подаче реагента (сгуститель выбирается случайным образом);

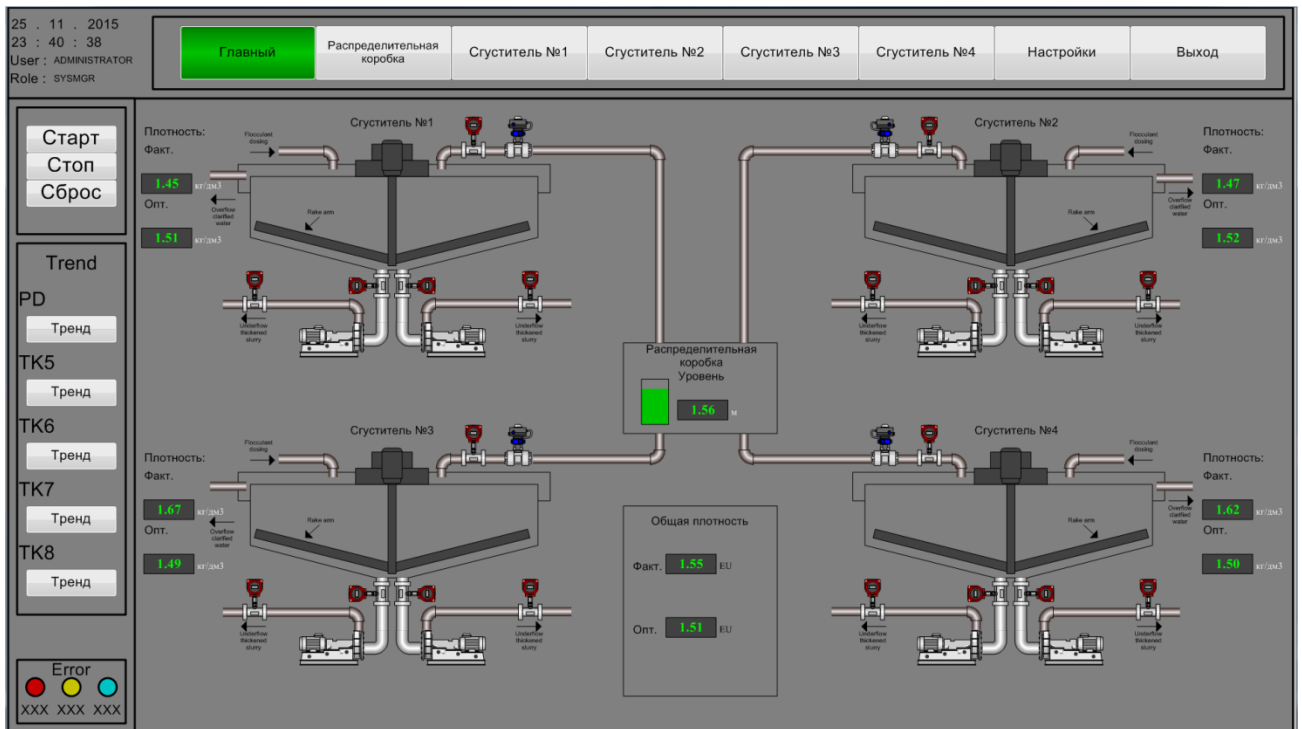


Рисунок 61 – Главный экран оператора. Тренажер для симуляции работы передела сгущения

На рисунке 61 представлено главное окно тренажера. В левой части экрана находятся три кнопки «СТАРТ», «СТОП», «СБРОС». Это кнопки по управлению работой тренажера.

Чтобы начать работу с тренажером, испытуемый должен нажать кнопку «СТАРТ» и выполнять указания системы, а также следить за ходом процесса. Кнопка «СТОП» останавливает работу модели. Кнопка «СБРОС» доступна во время работы и позволяет начать работу заново.

Как было сказано выше, помимо ведения процесса, оператору предлагается выполнять задания. Задание появляются каждые X минут (можно менять значение) и представляют собой всплывающие окна с кнопкой «ОК».

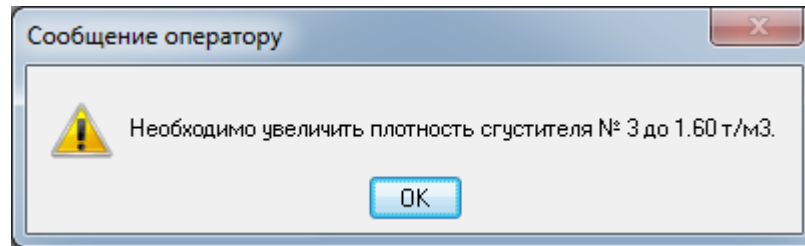


Рисунок 62 – Задание для оператора

После нажатия кнопки «ОК», система полагает, что оператор принял задание и начал его выполнение, при этом происходит запись действия оператора в базу данных SQL Server.

Управление и ведение процесса сгущения происходит на главном экране оператора.

Для аналоговых значений используется следующая цветовая анимация:

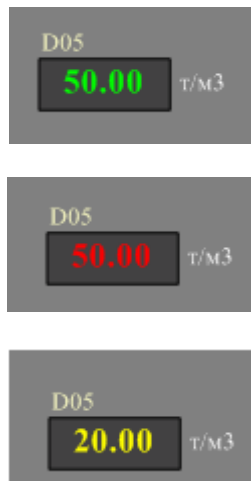


Рисунок 63 – Цветовая анимация аналогового параметра (Норма, Авария, Предупреждение)

Управление насосами происходит с помощью всплывающих окон (Рисунок 64). Каждый насос имеет свое окно, которое вызывается нажатием левой кнопки мыши. Кнопки «Старт» и «Стоп» позволяют запускать и останавливать насос соответственно. Кнопка режима «Автомат» позволяет перевести насос в автоматический режим и запустить работу алгоритма стабилизации плотности передела сгущения. Также на всплывающем экране реализована возможность ввода частоты для электродвигателя насоса.



Рисунок 64 – Всплывающее окно насоса

Как было сказано выше, кнопки «СТАРТ», «СТОП», «АВТОМАТ» позволяют оператору управлять насосом, а статус оборудования выдается в нижней строке всплывающего окна и может иметь следующие значения:

- «В работе» - режим нормальной работы насоса;
- «Остановлен» - насос остановлен в нормальном состоянии;
- «Недостоверность сигнала» - отсутствие сигнала от ПЛК;
- «Авария» - аварийное состояние насоса.

Состояние насоса также анимируется в цвете:

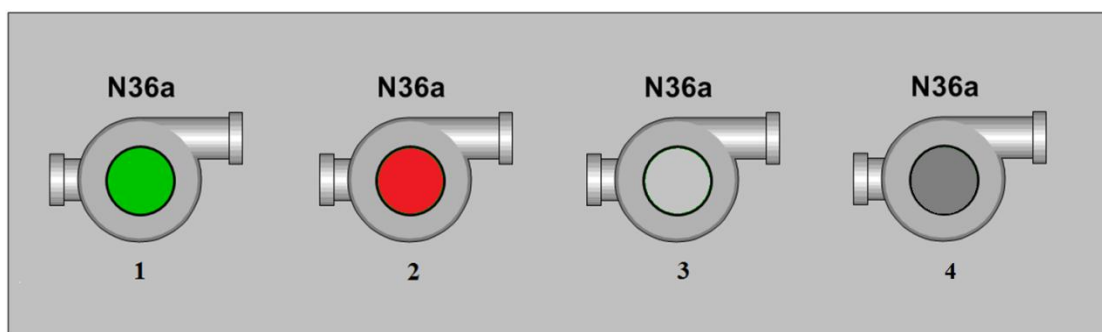


Рисунок 65 – Цветовая анимация работы насоса

где 1 – в работе, 2 – авария, 3 – остановлен, 4 – недостоверность сигнала

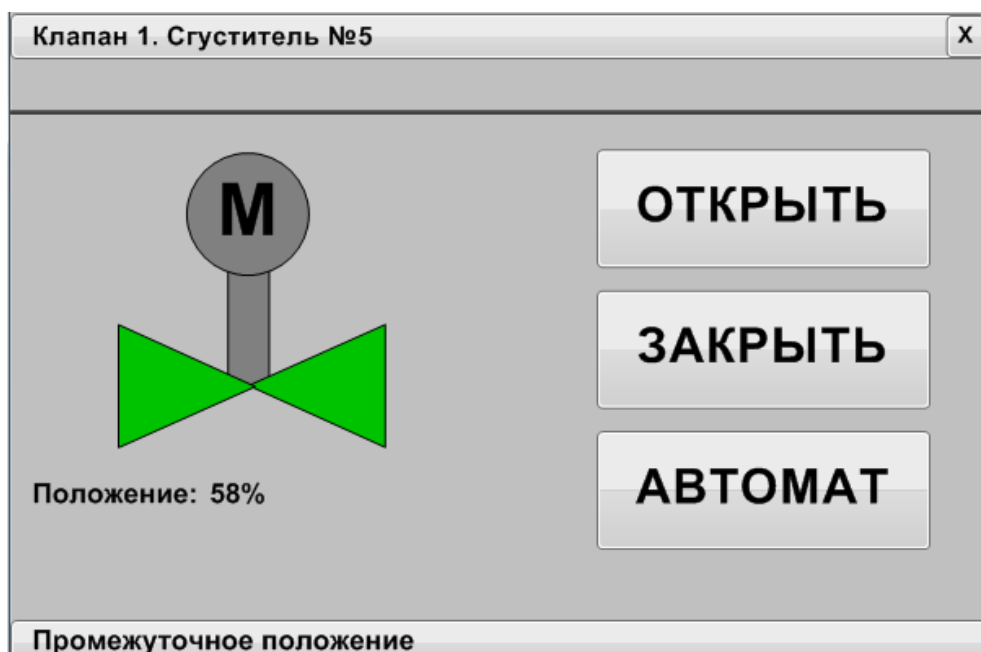


Рисунок 66 – Всплывающее окно клапана

Управление клапанами происходит с помощью всплывающих окон (Рисунок 66). Каждый клапан имеет свое окно, которое вызывается нажатием левой кнопки мыши. Кнопки «Открыть» и «Закрыть» позволяют открывать и закрывать клапан соответственно. Кнопка режима «Автомат» позволяет перевести клапан в автоматический режим и запустить работу алгоритма стабилизации плотности передела сгущения. Статус клапана отображается в нижней части всплывающего окна и может иметь следующие значения:

- «Открыт» - состояние полного открытия клапана на 100%;
- «Закрыт» - состояние полного закрытия клапана, положение равняется 0 %;
- «Промежуточное положение» - положение клапана между 0 – 100 %;
- «Авария» - аварийное состояние клапана;
- «Недостоверность сигнала» - отсутствие сигнала ПЛК.

Состояние клапана также анимируется в цвете и представлено на рисунке 67.

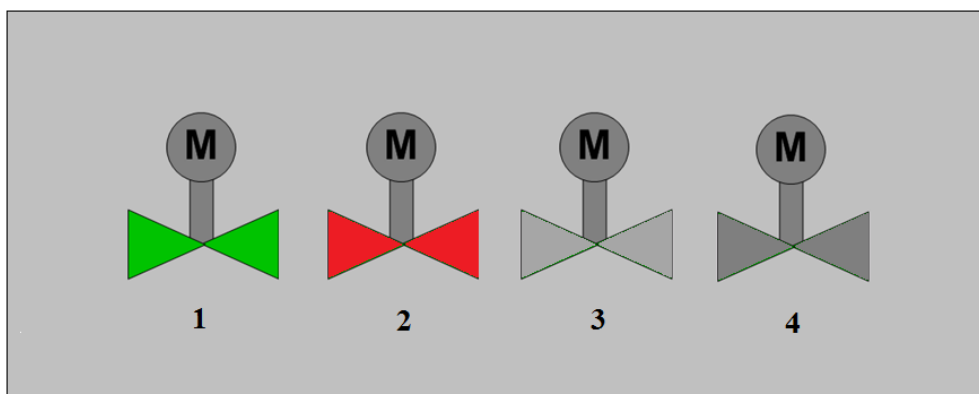


Рисунок 67 – Цветовая анимация работы клапана

где 1 – открыт, 2 – авария, 3 – закрыт, 4 – недостоверность сигнала

В данной главе было рассмотрено создание программных продуктов процесса сгущения.

В первой части указано описание системы стабилизации процесса сгущения. Такой продукт и заложенный в нем алгоритм позволяют стабилизировать целевой параметр процесса, используя только программное управление. Для внедрения такого решения требуется наличие управляющих сигналов в отделении, стабильная подача реагента, а также наличие АРМа оператора.

Использование данного программного продукта позволяет стабилизировать процесс без значительных затрат на физическое исполнение системы, а также на покупку дорогостоящих лицензий для SCADA систем.

Во второй части главы рассмотрен разработанный в ходе диссертационной работы тренажер передела сгущения, на который было получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2015614355 [86].

Такой тренажер позволяет значительно упростить обучение нового персонала, а также оценить готовность уже работающих операторов.

Также, благодаря данному тренажеру возможно обучение персонала работе с новой автоматизированной системой управления, что значительно ускоряет ее внедрение в процесс.

ГЛАВА 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

4.1 Процесс обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя

При производстве никеля применяется обжиг никелевого концентрата в печах кипящего слоя. Концентрат после флотационного разделения фанштейна направляется на сгущение и фильтрацию, а после, в печь кипящего слоя. Основные плюсы данной печи это высокая производительность и простота конструкции.

Принцип действия печи кипящего слоя состоит в том, что через слой сыпучего материала проходит поток теплоносителя, в определенный момент дутья, скорость потока уравнивается с массой материала, и он приобретает псевдоожиженое состояние [31]. Такое состояние способствует равномерному контакту всей поверхности частицы и теплоносителя [6, 7].

Величина скорости дутья имеет огромное значение для правильного ведения процесса обжига никелевого концентрата. Существует минимальная критическая скорость дутья, которая переводит концентрат в псевдоожиженое состояние, также существует максимальная критическая скорость дутья, в соответствии с которой возможен вынос частиц из печи [6].

Очевидно, что для уменьшения выноса частиц материала из печи кипящего слоя необходимо, чтобы частицы имели относительно одинаковые размеры. В случае, когда частицы материала имеют различную крупность, для одних частиц скорость дутья будет способствовать псевдоожижению, для других эта же скорость будет способствовать их выносу [6, 7, 66].

Функционально обжиг никелевого концентрата происходит следующим образом. Концентрат непрерывно подается в печь кипящего слоя, в то время как обжиговый продукт удаляется из печи самотеком [6].

Как правило, вместе с шихтой в печь поступает и влага, которая впоследствии испаряется и вступает в реакцию, максимально допустимый уровень влажности составляет 5 %. Если влажность концентрата выше этого значения, то происходит разрушение увлажненных кусков материала, что негативно сказывается на ведении процесса обжига. Поэтому концентрат либо осушают до нужного процентного содержания влаги, либо, наоборот, увлажняют до 30 %, когда концентрат приобретает пульповое состояние.

При ведении обжига сульфидов в печах кипящего слоя необходимо учитывать, что плавка материала, вследствие наличия жидкой фазы, является аварийным состоянием процесса. Из-за оплавления обжигаемого концентрата кипящий слой распадается, и частицы прекращают свое взвешенное движение [6].

Процесс обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя как потребляет большое количество тепла, так и выделяет его, то есть во время обжига происходят и экзотермические, и эндотермические процессы. Отвод выделяемого тепла происходит за счет использования теплообменников, потребление тепла происходит за счет сжигания топлива.

Главной целью обжига сульфидного флотационного никелевого концентрата является перевод этого концентрата в окисленный никель (NiO), из которого дальнейшее восстановление никеля в трубчатой вращающейся посредством добавления кокса является рациональным.

Процесс обжига в кипящем слое обеспечивает полное окисление никеля, потому что даже мелкие частицы, находящиеся над кипящим слоем подвергаются обжигу посредством вторичного дутья [7].

В ходе обжига никелевого концентрата образуются газы, объем которых напрямую зависит от параметров дутья. В случае использования газов с высоким содержанием кислорода выход газообразных продуктов уменьшается, напротив, при образовании в ходе процесса оксидов углерода и разложении сульфатов, выход газообразных продуктов увеличивается [66].

Как было сказано выше, во время обжига никелевого концентрата происходит вынос пыли, который может достигать 90 %. Значительная часть пыли при этом улавливается циклонами, остатки в виде приблизительно 5 % улавливаются специализированной системой тщательного улавливания. Если использовать при обжиге материал в виде гранул, то пылевывнос значительно снижается [6, 7].

В процессе обжига материала в кипящем слое происходит накопление частиц в нескольких зонах кипящего слоя, такое явление называется сегрегацией. При этом некоторые процессы, например гранулирование или кристаллизация, обусловлены обязательным наличием сегрегации частиц материала, однако чаще требуется равномерное смешение [7].

Вследствие сегрегации, а именно накопления частиц в различных зонах кипящего слоя, происходит изменение времени пребывания этих частиц в аппарате. Выгрузка огарка сверху будет способствовать сегрегации крупных частиц, выгрузка огарка снизу - сегрегации мелких частиц.

Сегрегация влияет на процесс обжига в целом, а, следовательно, имеет значительное влияние и на вынос пыли из печи. Как известно, вынос пыли происходит в основном из верхних зон кипящего слоя, следовательно, в случае сегрегации частиц с низкой скоростью витания происходит увеличение пылевывноса, напротив, в случае с сегрегацией частиц с высокой скоростью витания пылевывнос уменьшается.

Печи кипящего слоя подразделяются на многокамерные и однокамерные, при обжиге медно-никелевого концентрата, рассматриваемом в настоящей работе, используется однокамерный вариант исполнения [6, 66].

В сечении печь кипящего слоя имеет форму круга или прямоугольника, при этом в зависимости от требований к скорости газового потока печь может иметь различные вариации исполнения ее верхней части (широкая или узкая).

Наружная часть печи кипящего слоя изготовлена из стального листа, предающего герметичность и жесткость конструкции аппарата, внутренняя часть

печи футерована шамотным кирпичом, имеющим огнеупорные свойства. Одну из важнейших частей печи – подину, заливают специализированным жароустойчивым бетоном. Функционалом пода печи является равномерное распределение газа. Внешний вид печи кипящего слоя представлен на рисунке 66.

Обжиг концентратов происходит следующим образом, реакционный газ подают в печь снизу, благодаря конструкции пода, газ равномерно распределяется, а также исключается попадание каких либо твердых частиц в газовые отверстия. Газообразные продукты выводятся из-под свода печи, а огарок выгружают либо с верхнего уровня кипящего слоя, либо с нижнего уровня. В случаях, когда требуется получение частично спекаемого огарка, а также для того, чтобы предотвратить сегрегацию крупных частиц в печи, используют разгрузку из нижнего уровня [21].

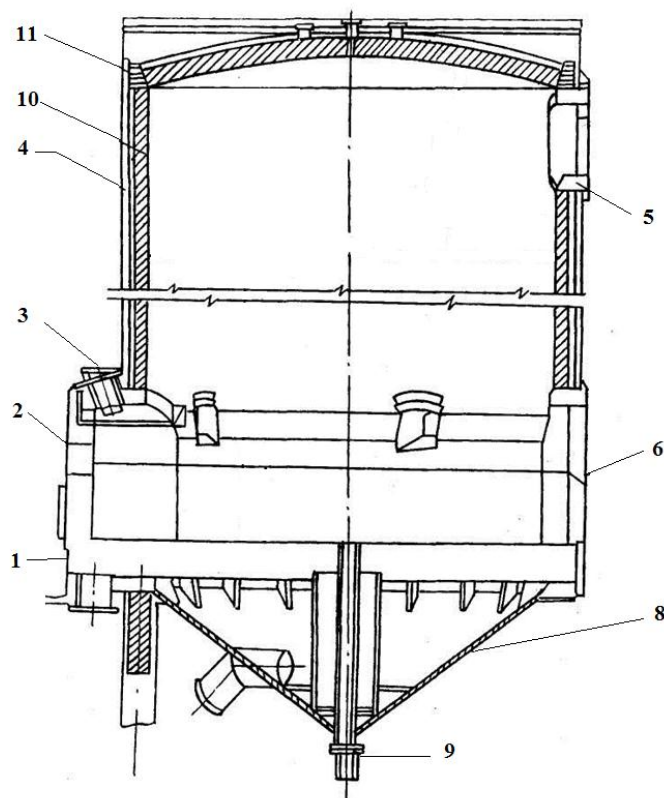
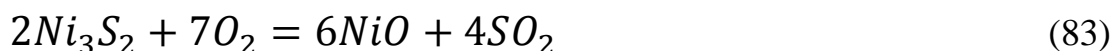


Рисунок 68 – Цилиндрическая печь кипящего слоя

где 1 - подина; 2 - форсунка для розжига печи; 3 - форкамера; 4 - корпус печи- 5 – отвод газа; 6 - сливной порог; 7 - воздушная коробка; 9 - пневмопривод; 10 – футеровка, 11 – свод

Как было сказано выше, основной целью окислительного обжига является максимально возможное удаление серы из сульфида никеля. Так как обжиг окислительный, то удаление происходит за счет следующей реакции [6, 7]:



Химическая реакция 83 называется реакцией десульфуризации, в ходе данной реакции появляется сернистый ангидрид и оксид никеля [6]. Однако помимо химических факторов, на ход реакции оказывает влияние также и кинетические, такие как скорость диффузионных процессов.

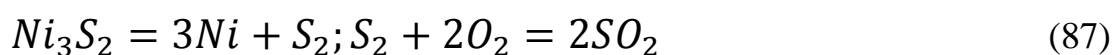
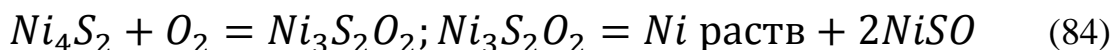
Процесс десульфуризации никеля обычно ведут при температуре около 1000 °С, при этом при 550°С низший сульфид никеля преобразовывается в твердый раствор, основанный на Ni_2S_3 , при 800 °С происходит его плавка. При температуре 350 °С односернистый никель вследствие фазового превращения поглощает тепло, а его плавка происходит при 1000°С.

Образование окисной фазы NiO в виде кристаллов обусловлено высокой температурой его плавления.

Сульфид никеля и металлический никель взаимно растворяются при температуре обжига, тогда как закись никеля в сульфиде нерастворима и выделяются в отдельную фазу.

Ниже представлены реакции, происходящие при окислении сульфида никеля (Ni_2S_3) [6, 7]:

1. Температура превышает 1200°С

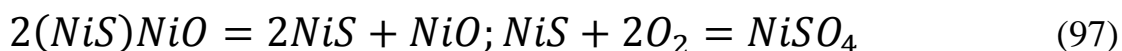
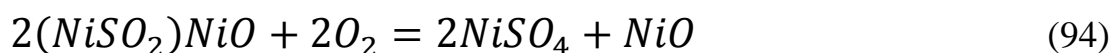


2. Температура равняется 900-1100°С





3. Температура ниже 700°C



Указанные выше реакции окисления сульфидов никеля в зависимости от температуры являются весьма условными. Ведь путь реакции зависит и от условий, в которых проводилось окисление. Если сульфид нагревать вместе с воздухом, то при невысоких температурах отсутствует его окисление, при этом при повышении температуры, в какой-то момент происходит резкое увеличение скорости окисления и дальнейшее воспламенение концентрата. После этого, процесс окисления сам обеспечивает себя теплом. Следовательно, температура воспламенения является необходимой температурой для самостоятельного протекания процесса окисления [6].

После проведенных исследований температур воспламенения частиц различной крупности было определено, что чем меньше частица сульфида никеля, тем меньше температура воспламенения.

Влажность воздуха также имеет влияние на температуру воспламенения, например, чем выше влажность, тем выше температура воспламенения сульфидов никеля.

Теоретические и экспериментальные данные подтверждают непостоянность температуры воспламенения сульфида никеля, которая зависит от множества факторов, таких как вид сульфида, крупность частиц, внешние условия и т. д..

Как правило, никелевый концентрат, полученный с коллективной флотации

медно-никелевого концентрата, имеет постоянный гранулометрический состав с крупностью до 75 мкм.

4.2 Моделирование процесса обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя

После исследования процесса сгущения медно-никелевого концентрата и методов их моделирования, был сделан вывод о возможности применения статистических методов при моделировании сложных распределенных производственных систем в металлургии. В главе 2 моделирование выполнялось двумя способами, каждый из которых показывает высокое сходство между моделью и производственными данными, однако использование GE Proficy CSense (Proficy Troubleshooter + Proficy Architect) значительно сокращает трудозатраты в процессе моделирования, не требует поиска кривых разгона, а также наглядно представляет основные зависимости процесса и их вид.

Исходя из этого, для второго процесса - обжиг никелевого концентрата в печи кипящего слоя, был использован программный пакет Proficy Troubleshooter.

Для исследования процесса обжига, использовались архивные данные металлургического предприятия.

Моделирование процесса обжига и изучение взаимосвязей этого процесса имеют также актуальную производственную задачу, необходимо рассчитывать расход огарка из печи, для того, чтобы более точно расходовать восстановитель. Проблема в определении расхода состоит в отсутствии расходомеров, способных работать при такой высокой температуре (1150 °C) [68].

С помощью программного продукта Proficy Troubleshooter требуется оценить возможную корреляцию загрузки концентрата и температуры потока огарка в трубчатую печь, что позволит доказать возможность ее использования для расчета расхода огарка. При наличии достаточной корреляции между этими параметрами, для определения расхода возможно будет использовать температуру точки, ведь ее теплосодержание зависит от количества тепла,

переданного ей огарком. Чем больше пройдет огарка, тем больше тепла будет передано течке. Определение расхода огарка позволит задавать точный расход восстановителя (угля) [68].

Для обработки выбраны значения параметров печи кипящего слоя за месяц. В общей сложности это 42642 значения каждого параметра с интервалом в минуту.

Обозначение параметров:

- Flow_conc – загрузка кека (никелевого концентрата), т/час;
- Pressure – давление в подине, кг/см²;
- Temp_1 – Температура в зоне загрузки кека в печь КС, °С;
- Temp_10 – Температура под сводом печи КС, °С;
- Temp_7 – Температура в зоне выгрузки кека из печи КС, °С;
- Temp_Flow – температура потока огарка из печи КС в трубчатую печь.

Для обжига в печи кипящего слоя используются флотационные никелевые концентраты, после обжига получают черновой жидкий никель, который далее разливается в аноды, следующие в электролизный участок для получения высокопроцентного катодного никеля.

Процесс обжига ведется по температуре под сводом печи кипящего слоя (Temp_10), поэтому для разработки статистической модели в программном пакете Proficy Troubleshooter данный параметр был выбран целевым, остальные данные были использованы в качестве возмущающих и управляющих факторов [6, 7].

В ходе исследования были получены следующие корреляционные зависимости (в скобках данные расчетов) [114]:

- Temp_10 – Flow_conc – 90,50 % (86,1%);
- Temp_10 – Pressure – 97,65 % (95,4%);
- Temp_10 – Temp_Flow – 72,20 % (73,78%);
- Temp_10 – Temp1 – 92,80 % (93,21%);

- Temp_10 – Temp7 – 80,79 % (79,50 %).

Также ввиду производственной необходимости была определена корреляция между температурой потока огарка в трубчатую печь и расходом огарка в печь кипящего слоя, получены следующие результаты - $\eta = 83,94\%$. Полученный корреляционный процент является значительным, что позволяет нам предполагать взаимосвязь температуры точки и расхода огарка.

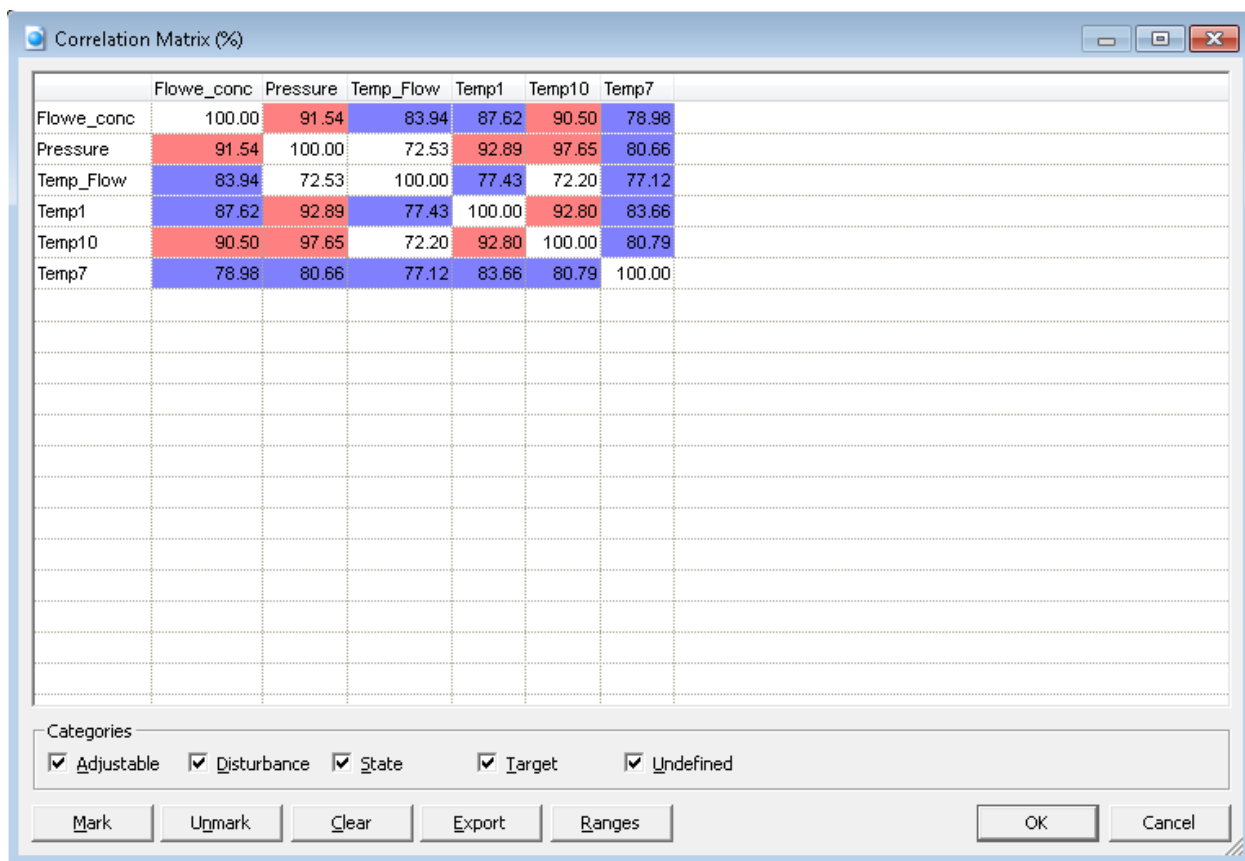


Рисунок 69 – Корреляционные зависимости процесса обжига

На рисунке 69 представлена корреляционная матрица процесса обжига [114], целевой параметр – температура под сводом печи °C (Temp_10), имеет высокие значения корреляционных зависимостей с каждым участвующим фактором, что позволяет получить модель с высоким процентом сходимости.

Созданная в Proficy Troubleshooter статистическая модель имеет следующие показатели:

- Model fit on construction cases = 95%;
- Model fit on validation cases = 97%.

На рисунке 70 представлено графическое сравнение модели и архивных данных.

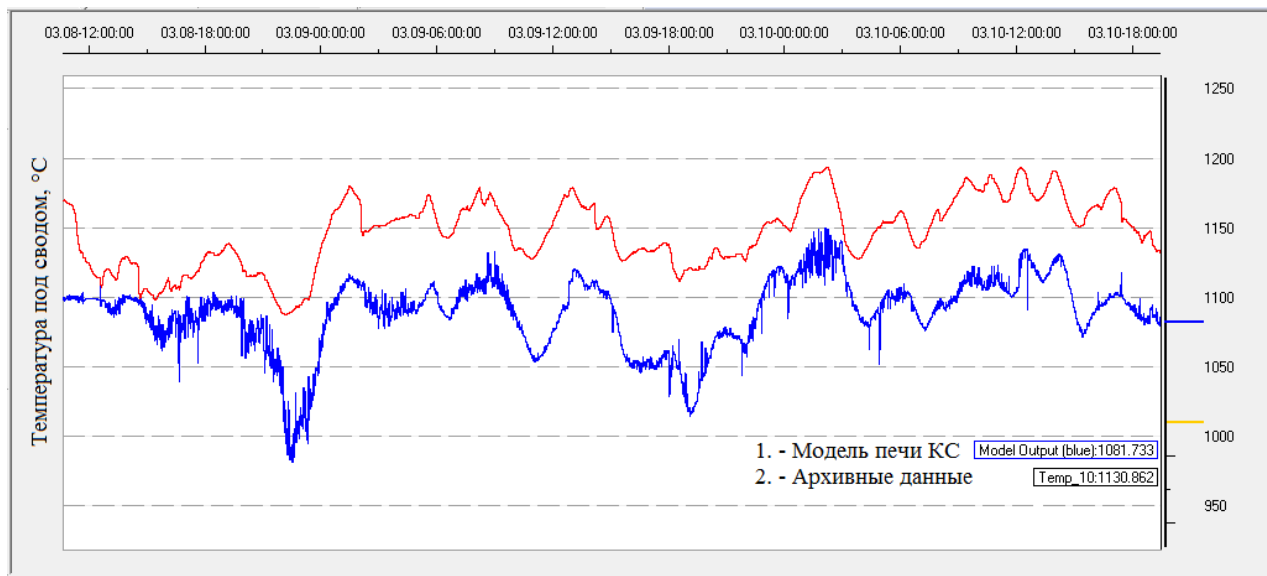


Рисунок 70 – Температура под сводом печи КС во времени

Согласно показателям сходимости модели и наглядному визуальному сравнению результатов работы этой модели (Рисунок 70), можно утверждать, что использование данной модели возможно для проведения исследования процесса обжига никелевого концентрата.

Корреляционная зависимость между температурой под сводом печи и подачей огарка составляет 90,50 %, характер этой взаимосвязи представлен на рисунке 71.

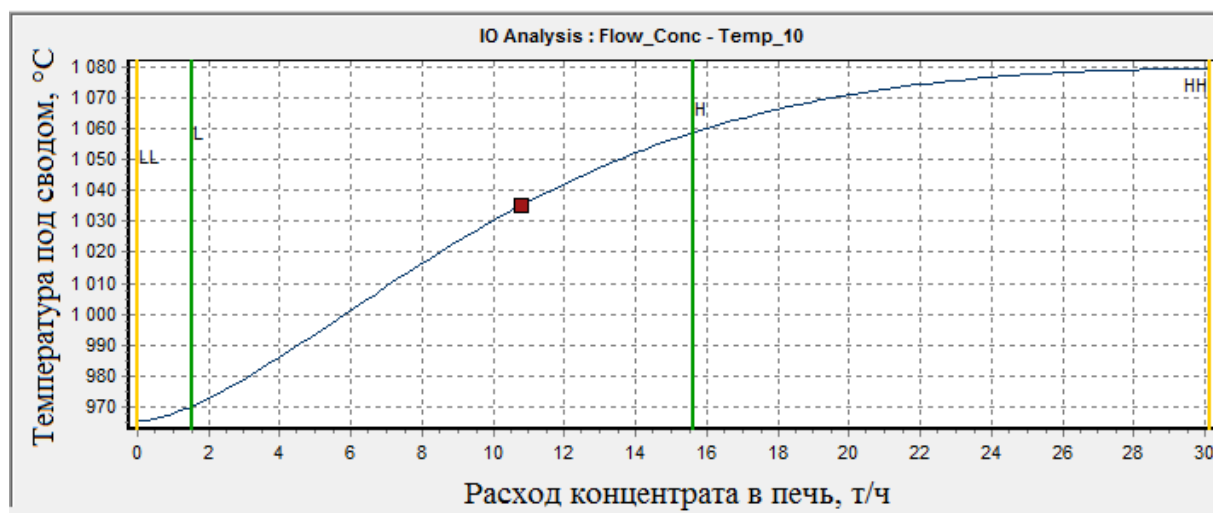


Рисунок 71 – Характер взаимосвязи температуры под сводом печи и расхода концентрата в печь

Согласно анализу Proficy Troubleshooter на отрезке расхода от 2 и до 28 т/ч, происходит увеличение температуры по функции $y = \sqrt{kx}$, где $k > 0$.

Далее рассмотрен характер зависимости расхода концентрата и температуры потока огарка в трубчатую печь.

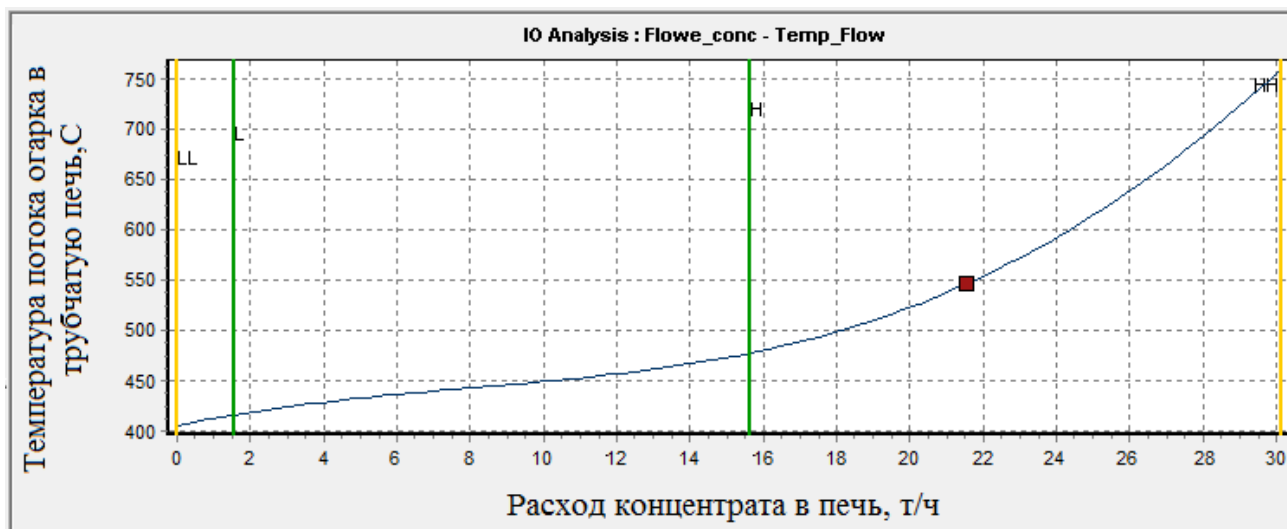


Рисунок 72 – Характер зависимости температуры потока в трубчатую печь и расхода концентрата в печь кипящего слоя

Согласно графику, полученному при изучении зависимости указанной на рисунке 72, с 0 до 12 т/ч зависимость $y = \sqrt{kx}$, где $k > 0$, с 12 до 30 т/ч зависимость $y = e^x$.

После проведения исследований выполнена оптимизация модели на основе двух влияющих факторов. Для управления целевым параметром (температура под сводом печи) были выбраны следующие переменные: расход концентрата в печь кипящего слоя, давление в подине печи. Рисунок 73 показывает оптимизированное значение температуры посредством управления расходом концентрата в печь КС и давлением в подине. Рисунок 74 показывает изменение управляющего воздействия на примере расхода.

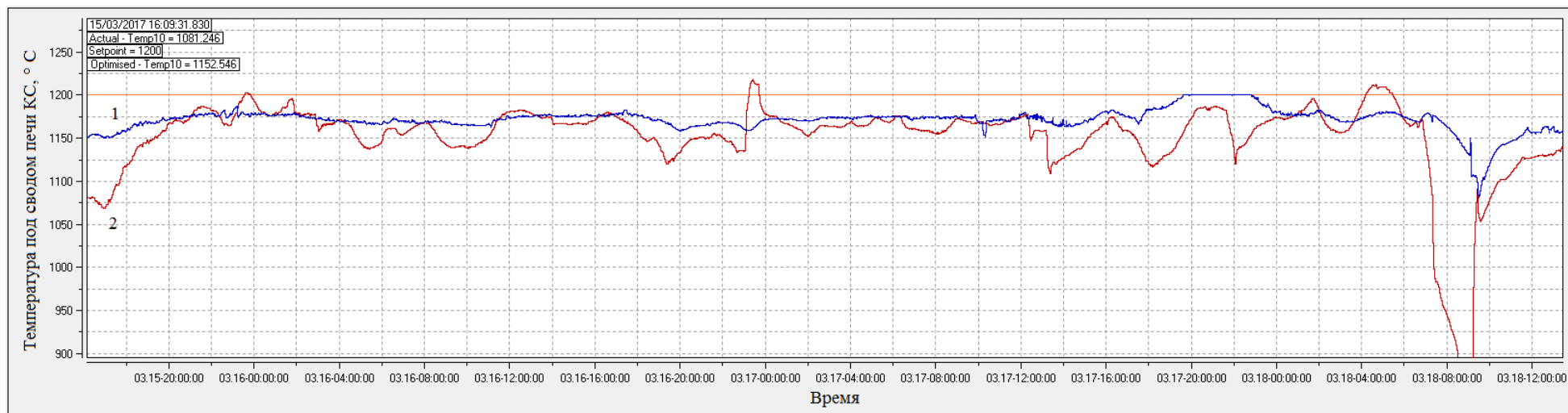


Рисунок 73 – Сравнение моделированного значения температуры и оптимизированного
 где 1– оптимизированное значение, 2 – моделированное значение

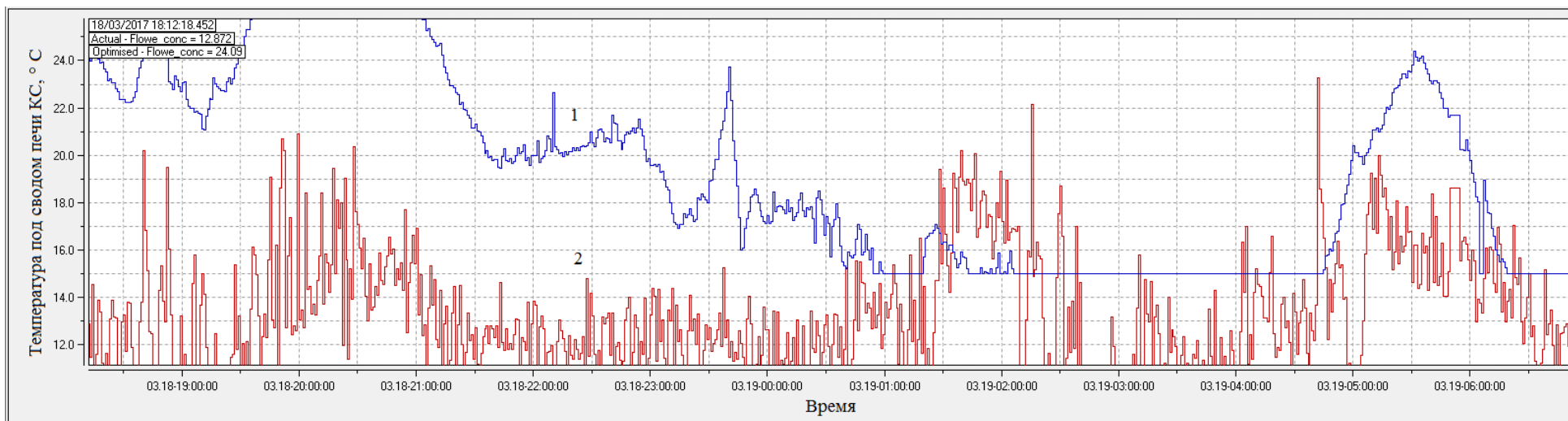


Рисунок 74 – Сравнение моделированного значения температуры и оптимизированного
 где 1– оптимизированное значение, 2 – моделированное значение

4.3 Разработка системы автоматизации, на основе модели полученной в Proficy Troubleshooter

Для разработки системы автоматизации, а также для оценки ее работы использовался программный пакет Proficy CSense, с помощью которого генерировались управляющие воздействия, и отслеживалась целевая функция процесса. В качестве модели печи кипящего слоя использовалась модель, полученная в предыдущей части настоящей главы.

Перед тем как приступить к синтезу автоматизированной системы управления, необходимо четко определить входные и выходные переменные процесса, а также зависимости между этими переменными, которые описывают работу всего объекта [1].

Печь кипящего слоя является непрерывно действующим реактором перемешивания, ведь загружаемый сульфидный никелевый концентрат в ходе процесса приобретает псевдооживленное состояние и, располагаясь горизонтально, постоянно перемешивается [21].

Снизу печи подается воздух, на малой скорости, в этот момент никелевый концентрат является неким подобием фильтра, при этом он остается без движения. По мере увеличения скорости дутья достигается такое ее значение, которое называется минимальной критической скоростью, именно при достижении дутьем этой скорости, материал переходит в псевдооживленное состояние [6].

Основная цель проведения обжига в печи кипящего слоя это перевод никелевого концентрата из сульфида в окисленный никель [7].

После изучения процесса обжига никелевого концентрата были определены основные входные переменные:

- Загрузка кека (никелевого концентрата), т/час;
- Давление воздуха в подине, кг/см².

Загрузка концентрата значительно влияет на производительность, давление воздуха влияет на скорость ведения процесса обжига.

В качестве выходных переменных были выделены температура под сводом печи, температура в зоне выгрузки огарка из печи, температура в зоне загрузки кека в печь и температура в точке огарка в трубчатую вращающуюся печь.

В результате исследований процесс был сделан вывод о том, что управление значением температуры процесса возможно посредством загрузки никелевого концентрата в печь.

Если для управления температурой выбрать канал «расход воздуха - температура», то имея постоянный состав по крупности частиц, будет происходить увеличение скорости дутья, что в свою очередь приведет к выносу большого процента пыли из аппарата, если же уменьшать скорость дутья, то возможно материал вообще не приобретет состояние псевдооживления. Следовательно, использование данного канала для управления температурой процесса невозможно [21].

Канал регулирования «расход воды - температура» согласно исследованиям и литературе является менее эффективным. При сравнении этого канала с каналом «расход концентрата - температура» получаем гораздо меньший коэффициент передачи тепла [21].

Таким образом, наиболее рациональным способом управления температурой в процессе обжига никелевого концентрата был выбран канал «расход концентрата - температура».

Оптимальным регулированием процесса обжига было бы регулирование концентрации сернистого ангидрида в газах посредством изменения загрузки концентрата, а также регулирование температуры посредством отвода тепла, при этом остальные управляющие параметры стабилизировались бы отдельными настроенными регуляторами.

Однако использование отвода тепла как управляющего воздействия также не эффективно. Количество тепла, выделяемое процессом значительно и эффективного в экономическом плане диапазона регулирования отвода тепла достичь, на данный момент, невозможно.

Вследствие этого на медных и никелевых заводах используется схема с регулированием температуры посредством расхода концентрата в печь, при этом концентрация сернистого ангидрида в газах не регулируется [21].

После изучения взаимосвязей процесса обжига концентратов в печи кипящего слоя был сделан вывод о том, что благодаря значительной взаимосвязи концентрации сернистого ангидрида и температуры обжига при стабильном отводе тепла, концентрация сернистого ангидрида при регулировании температуры не превышает одного процента.

Автоматизированному контролю подвергаются следующие узлы печи кипящего слоя:

- Регулирование температуры кипящего слоя;
- Контроль давления;
- Регулирование подачи концентрата.

Измерение температуры выполняется хромель-алюмелевыми термопарами в нескольких точках (кипящий слой, свод печи, выход газа в циклоны), показания с термопар передаются на модули аналогового ввода ПЛК PACSystem Rx3i.

Управление параметром температуры происходит посредством протокола Modbus RTU с помощью которого регулятор с прогнозирующей моделью управляет частотным преобразователем от GE Fanuc, к которому подключен электродвигатель вращающий ленточный питатель. Частота преобразователя может изменяться от 0 до 200 Гц, то есть можно сообщить электродвигателю скорость вращения до 2000 оборотов в минуту.

Согласно логике системы управления, в зависимости от температуры, регулятор будет изменять частоту частотного преобразователя, тем самым увеличивая или уменьшая скорость питателя. При этом все двигатели имеют два режима работы, первый автоматический, когда происходит выполнение алгоритма управления и второй – ручной, когда оператор может самостоятельно задавать частоту вводом числа с АРМ-а оператора.

В соответствии с обработкой данных в Proficy Troubleshooter, а также с изложенными выше исследованиями процесса обжига никелевого концентрата, были выделены следующие управляющие воздействия – загрузка концентрата в печь кипящего слоя [113, 114].

Система автоматизации имеет следующие функции:

- Контроль работы и состояния оборудования (электродвигатели, температурные датчики, расходомеры);
- Контроль давления в подине;
- Стабилизация и управление температурой под сводом печи;
- Отслеживание аварийных и предупредительных ситуаций;
- Контроль расхода питания печи КС.

Для управления была выбрана одноконтурная система «расход концентрата в печь – температура под сводом» [21].

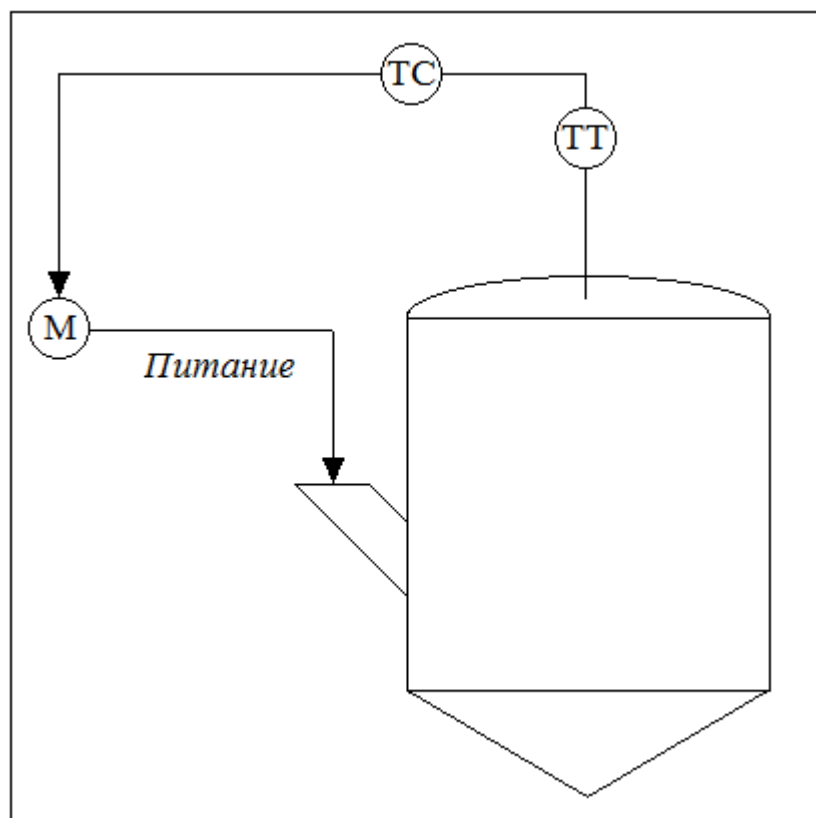


Рисунок 75 – Система управления температурой под сводом печи

Разработка системы автоматизации была проведена в среде Proficy Troubleshooter, однако ее реализацию для внедрения в производственный процесс необходимо проводить на основе специализированных программных решений. В настоящей диссертационной работе для управления процессом обжига сульфидных никелевого концентрата были выбраны продукты компании GE Intelligent Platforms.

Для управления контрольно-измерительными приборами нижнего уровня выбран ПЛК PAC System RX3i от компании GE, контроллер обеспечивает следующие функции:

- Дискретное управление клапанами;
- Аналоговое управление частотными преобразователями ленточного конвейера;
- Получение информации с аналоговых датчиков 4 – 20 мА и дальнейшее ее преобразование к инженерным величинам;
- Получение информации с дискретных датчиков;
- Генерирование тревог производственного процесса;
- Связь со SCADA системой.

Для отображения информации о ходе процесса обжига используется SCADA системы Proficy Simplicity от GE, которая обеспечивает следующие функции:

- Отображение мнемосхемы процесса в виде потоков и аппаратов;
- Отображение значений измеряемых величин процесса;
- Доступ оператора к удаленному управлению исполнительными механизмами;
- Отображение аварийных и предупредительных сигналов;
- Архивирование данных производственного процесса в БД.

На рисунке 76 представлена схема контрольно технических средств разработанной системы автоматизации.

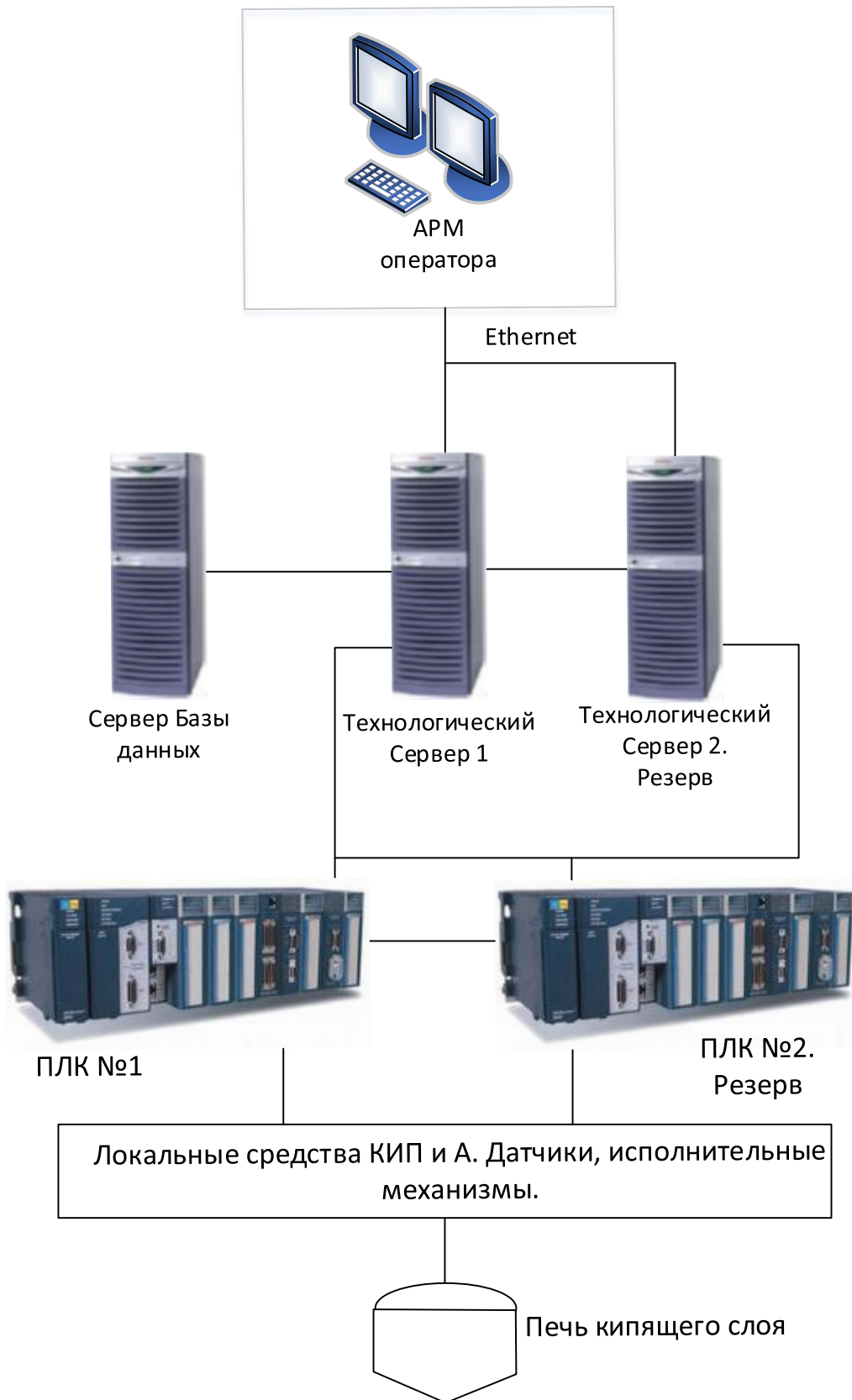


Рисунок 76 – Схема контрольно-технических средств АСУТП обжига никелевого концентрата

В качестве локальных средств КИП и А используется следующее оборудование:

- Термопары;
- Датчики и преобразователи давления;
- Расходомеры (для контроля подаваемого концентрата в печь).

В качестве термопар планируется использовать хромель-алюмелевые термопары с диапазоном измерения 0 – 1300°C, сигнал с которых напрямую подается на модуль аналогового ввода, в настройках которого существует возможность выставить прием сигнала с термопар (4-20 мА). Погрешность измерений термопары составляет $\pm 0,5^\circ\text{C}$ до $\pm 1^\circ\text{C}$, зависимость выходного сигнала от температуры – линейная.

Для контроля давления в печи, в качестве преобразователя и датчика давления подобран интеллектуальный датчик 1143 серии Метран-100 с диапазоном измерения 0-250 кПа, основная погрешность измерений $\pm 0,1\%$. Сигнал с датчика подается на модуль аналогового ввода ПЛК в виде токового значения 4-20 мА.

В качестве расходомера для никелевого концентрата был выбран расходомер электромагнитный SITRANS FM Transmag 2, с диапазоном скорости потока 0,1-12 м/с. Погрешность при измерении расхода, составляет $\pm(0,5+0,12/v)\%$, где v – скорость потока. На модуль аналогового ввода ПЛК приходит сигнал 4 – 20 мА.

Программируемый логический контроллер подобран в конфигурации, рассмотренной в главе 2.

Автоматизированная система управления процессом обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя строится на основе прогнозирующей модели Proficy Troubleshooter. Такой подход позволяет достичь значительного улучшения качества регулирования объектом автоматизации. Созданную систему можно периодически обучать различными срезами данных.

Использование автоматизированной системы совместно с Proficy Troubleshooter дает возможность использовать функции данного программного пакета либо в качестве «советчика оператора», либо в качестве управляющей системы.

Ниже рассмотрено внедрение прогнозирующей модели в разработанную систему автоматизированного управления на основе продуктов GE IP.

Программный продукт Proficy Troubleshooter использует для работы отдельный сервер, который посредством сети Ethernet связан с сервером HMI Proficy Simplicity (Рисунок 77).

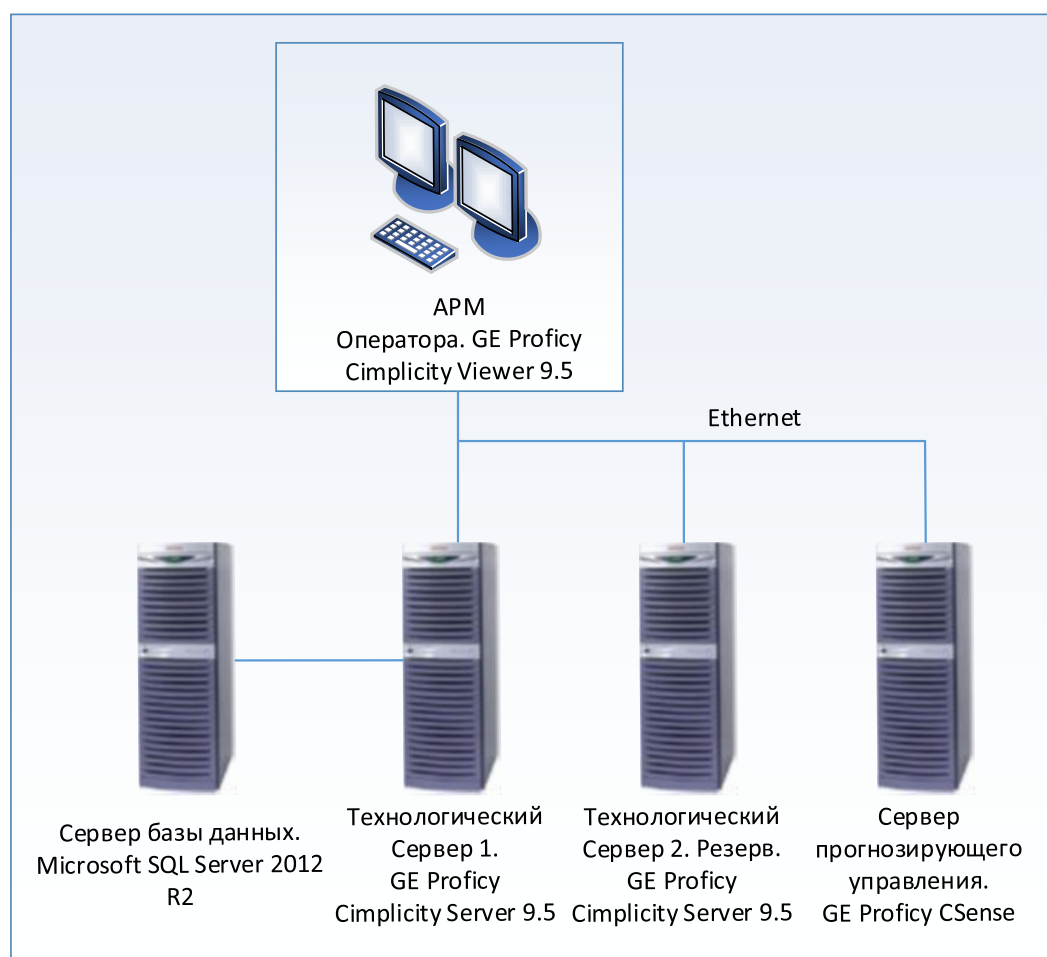


Рисунок 77 – Структура программного обеспечения АСУТП печи кипящего слоя

Работа АСУТП происходит следующим образом. Сервер GE Proficy Cimplicity, получает информацию от контроллера PAC System Rx3i, сохраняет ее в базу данных Microsoft SQL Server 2012 R2, генерирует аварии, предупреждения,

производит расчеты, а также выдает информацию оператору на АРМ под руководством Proficy Cimplicity Viewer.

Также Proficy Cimplicity Server по сети Ethernet связывается с сервером прогнозирующего управления, которому передает информацию, получаемую с контроллера (температура печи) и с которого забирает информацию для контроллера (управление расходом концентрата).

Сервер прогнозирующего управления печью кипящего слоя работает на основе программного продукта, входящего в пакет Proficy CSense – Action Object Manager [114]. В данном продукте функционирует модель процесса обжига никелевого концентрата, а также оптимизационный блок, управляющий расходом никелевого концентрата в печь, для поддержания целевого параметра на значении равном уставке оператора.

Все параметры модели задаются с АРМа оператора и через Cimplicity Server передаются в ПЛК, где происходит их обработка и выдача дальнейших управляющих воздействий (частота для частотного преобразователя).

Созданная во второй части данной главы модель печи кипящего слоя в Proficy Troubleshooter, была экспортирована в Proficy Architect [113, 114]. Модель представляет собой черный ящик, на вход которого подаются архивные данные (Рисунок 78).

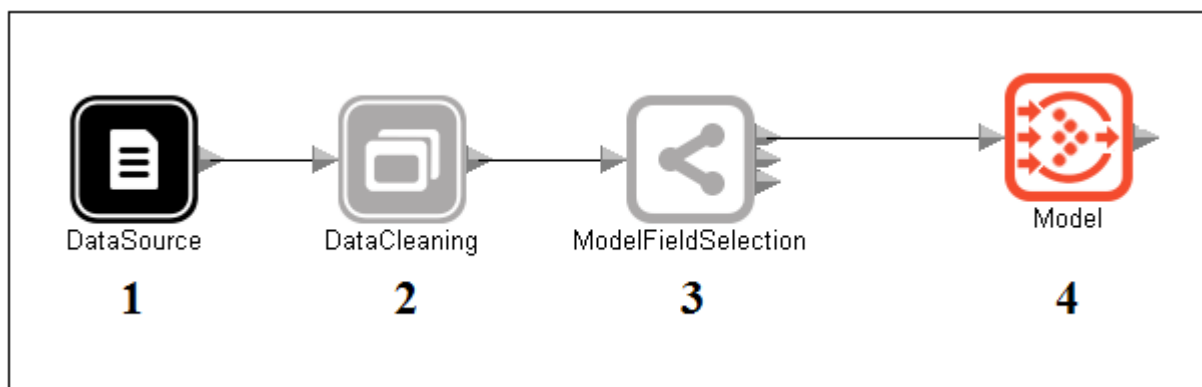


Рисунок 78 – Модель печи кипящего слоя в Proficy Architect

где 1 – архивные данные, 2 – обработка данных, 3 – распределение входных полей для модели, 4 – модель печи

К данной модели была применена нелинейная оптимизация параметра температуры под сводом печи. Для этого были выбраны следующие настройки блока оптимизации:

- Критерий оптимизации: модуль (Выход модели - 1200) \rightarrow min;
- Управляющее воздействие – Flow_Conc (Поток концентрата в печь).

Ограничения по управлению. Для загрузки концентрата в печь кипящего слоя – 2-28 т/ч.

С помощью блока оптимизации, Proficy Architect стабилизировал температуру под сводом печи на значении 1200°C , управляя величиной расхода концентрата. Регулирование происходило на основе знаний, заложенных в модель печи кипящего слоя, то есть регулятор, прогнозируя поведение целевой величины, управляющими воздействиями предвосхищает ее значительные колебания. Такой способ управления является предпочтительным по отношению к стандартному ПИД регулированию с обратной связью.

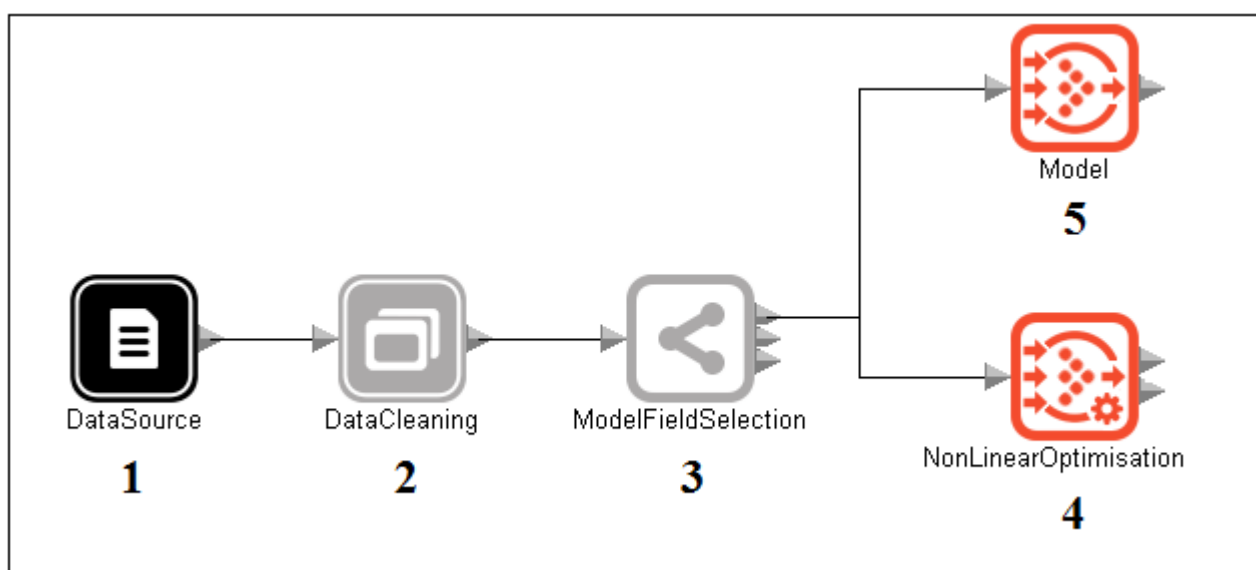


Рисунок 79 – Оптимизационный блок для модели печи кипящего слоя где 1 – архивные данные, 2 – обработка данных, 3 – распределение входных полей для модели, 4 – модель печи, 5 – блок оптимизации

На рисунке 80 представлена работа блока по оптимизации процесса обжига никелевого концентрата.

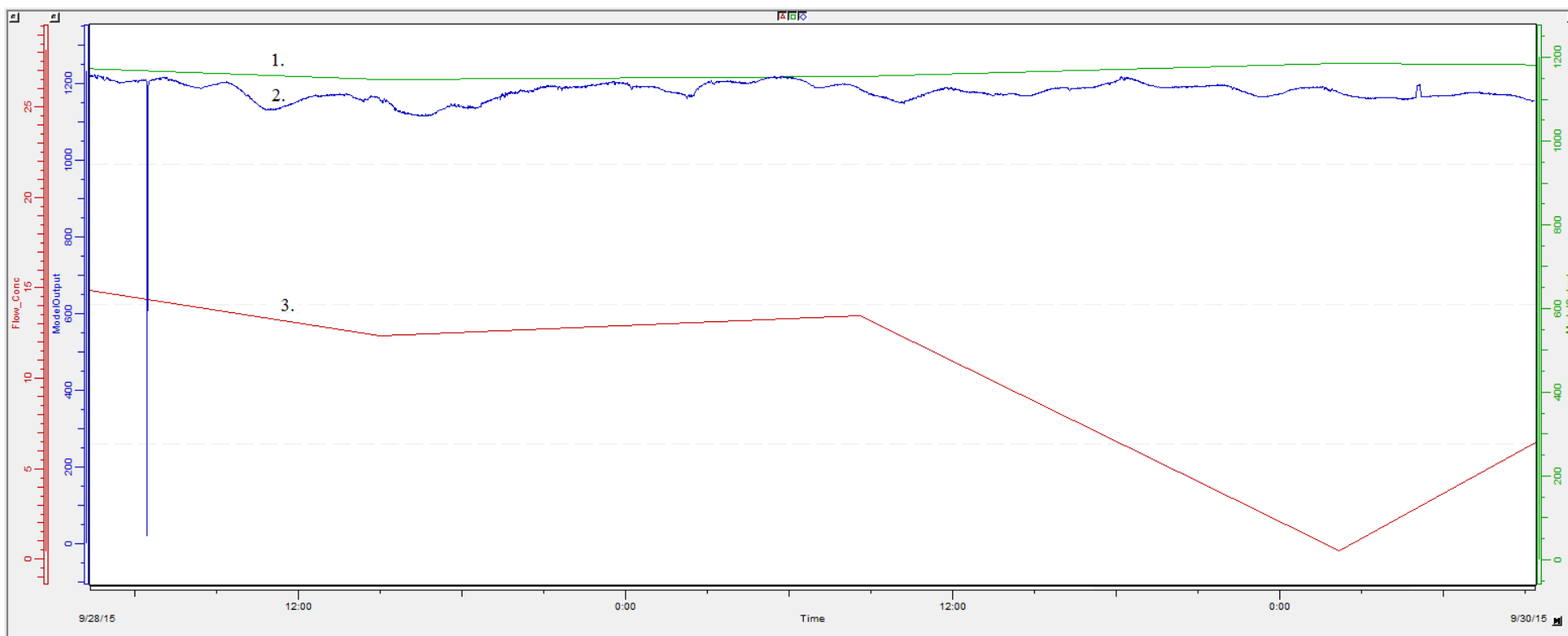


Рисунок 80 – Оптимизация процесса обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя

где 1 – оптимизированное значение температуры под сводом печи, °С, 2 – моделированное значение температур под сводом печи, °С, 3 – расход концентрата в печь, т/ч

Для передачи информации между сервером Proficy Simplicity и сервером прогнозирующего управления, в Proficy Architect были добавлены OPC блоки передачи данных. OPC блок позволяет модели получать информацию от контроллера через сервер HMI SCADA, а также передавать управляющие воздействия от системы оптимизации в контроллер.

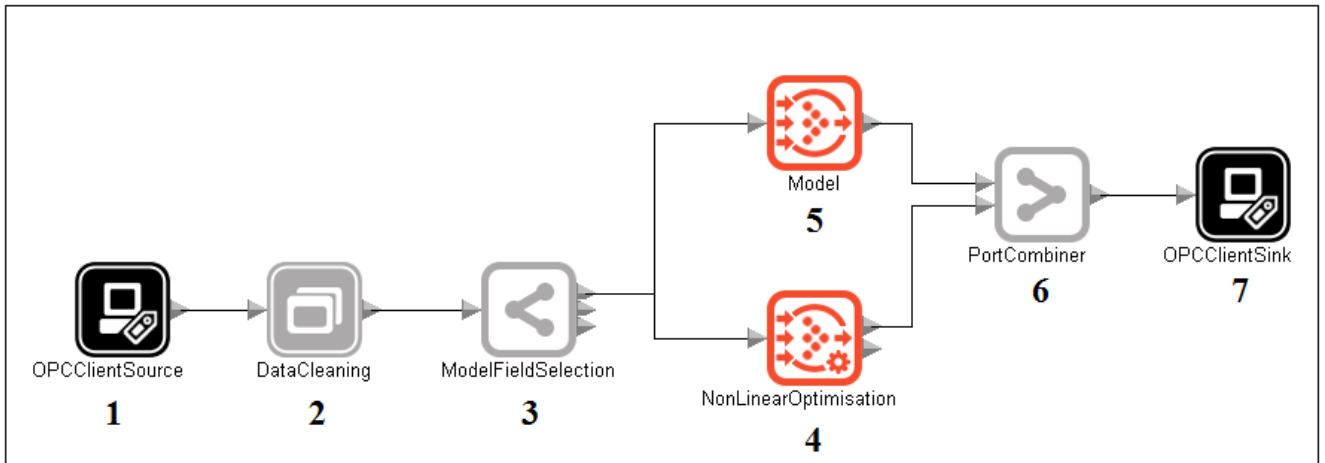


Рисунок 81 – Система оптимизации процесса обжига никелевого концентрата где 1 – входные данные из ПЛК, 2 – подготовка данных, 3 – распределение входных полей для модели, 4 – модель печи кипящего слоя, 5 – блок оптимизации процесса, 6 – блока объединения сигналов, 7 – блока передачи данных в ПЛК

Данные полученные в Proficy Simplicity Server посредством технологии OPC представлены в инструмента «Control Panel»:

Point ID	Value	Units	Timestamp	Description
\\FURNACE\FLOW_CONC	0		9/1/15 19:22:55.786969 PM	Расход концентрата в печь. Управление
\\FURNACE\TEMP_10	1162.680467		9/1/15 19:22:55.793969 PM	Температура под сводом печи. Модель
\\FURNACE\TEMP_10_OPT	1162.112173		9/1/15 19:22:55.790969 PM	Температура под сводом печи. Оптимизированное
\\FURNACE\TEMP_10_REAL	1132.942000		9/1/15 19:22:55.798970 PM	Температура под сводом печи. Архив
\\FURNACE\FLOW_CONC_REAL	15		9/1/15 19:22:55.788969 PM	Расход концентрата в печь. Архив

Рисунок 82 – Данные полученные в SCADA система GE Proficy Simplicity

В данной главе был рассмотрен процесс обжига сульфидного никелевого концентрата, с помощью программного пакета Proficy Troubleshooter были исследованы основные взаимосвязи процесса, а также определен характер этих взаимосвязей.

Вследствие проведенного исследования, было предложено использовать температуру потока огарка в трубчатую печь для определения расхода этого огарка. Корреляционная зависимость и определенный вид взаимосвязи позволяет провести расчет величины расхода, что имеет значительный производственный интерес, ввиду того, что в настоящий момент на мировом рынке измерительных приборов не существует расходомеров, работающих при столь высоких температурах (до 1200 °C).

Моделирование процесса обжига проводилось с помощью Proficy Troubleshooter, использование данного инструмента значительно повысило качество полученной статистической модели, что в свою очередь, позволило сделать выводы о взаимосвязях переменных процесса.

Также в данной главе была создана автоматизированная система управления процессом обжига никелевого концентрата на основе регулятора с прогнозирующей моделью, что позволило значительно улучшить качество ведения процесса. Данный вид регулирования позволяет стабилизировать целевой параметр – температуру под сводом печи, используя в своей основе не ПИД регулирование, а регулирование на основе знаний, полученных от статистической модели. В результате работы системы управления с наличием возмущений по расходу воздуха в печь, был получен стабильный температурный параметр. Стабилизированное значение температуры газов под сводом печи позволяет полностью обжигать тонкие фракции никелевого концентрата, а также выдерживать температурные границы работы пылеулавливателей.

Результаты работы системы управления представлены на рисунке 80, согласно которому, температура под сводом печи кипящего слоя имеет установившееся значение на отметке уставки, колебания параметра отсутствуют.

ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НИКЕЛЕВОГО КОНЦЕНТРАТА В ПЕЧИ ВЗВЕШЕННОЙ ПЛАВКИ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

5.1 Процесс взвешенной плавки никелевого концентрата

В данной главе рассмотрен процесс взвешенной плавки никелевого концентрата, полученного в ходе обогащения богатых медно-никелевых руд. Выходным продуктом обогатительной фабрики является никелевый, медный и пирротиновый концентраты. Основными объектами диссертационной работы являются печи перерабатывающие никелевый концентрат.

Состав никелевого концентрата отправляемого на переработку в печь взвешенной плавки: пирротин – 48,9%, пентландит – 24,5%, халькопирит – 7,5%, нерудные минералы – 10,6%, магнетит – 0,5%.

Содержание никеля в концентрате находится в диапазоне 8-10 %. Для поддержания такого диапазона и для уменьшения колебания состава концентрата было предложено использовать автоматизированную систему параллельного управления процессом сгущения медно-никелевого концентрата.

Передел сгущения является одним из важнейших звеньев обогатительного предприятия, стабилизация этого процесса, а именно, плотности сгущаемого продукта позволяет значительно сократить материальные затраты на стадии флотации. Плотность медно-никелевого концентрата необходимо поддерживать на значении $\sim 1,5 \text{ т/м}^3$, что позволяет получать выходной никелевый концентрат с содержанием никеля 9 %.

После передела сгущения, медно-никелевый концентрат отправляется на коллективную флотацию, откуда никелевый концентрат поступает на металлургическое предприятие, хвосты коллективной флотации отправляются на основную никелевую флотацию, продукт которой также отправляется на переработку.

На рисунке 83 представлена технологическая схема переработки никелевых концентратов, готовым продуктом которой является товарный файнштейн

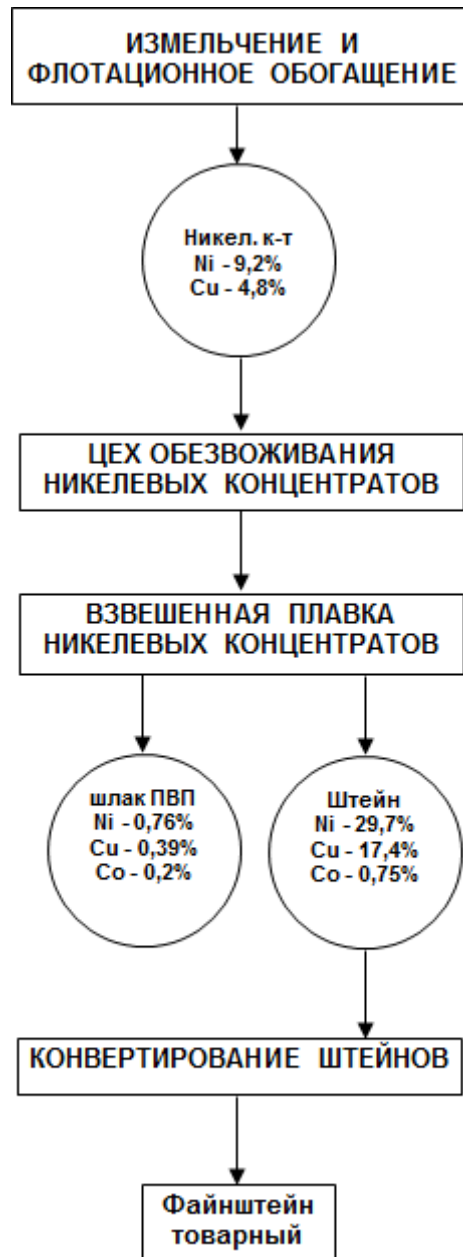


Рисунок – 83 Технологическая схема переработки никелевых концентратов

Взвешенную плавку никелевого концентрата можно отнести к классическим автогенным процессам, ведь тепловой баланс печи обеспечивается посредством экзотермических реакций окисления металлов. Основной реакцией является окисление сульфида железа в присутствии SiO_2 . [57]

Первое внедрение процесса взвешенной плавки сульфидных концентратов было проведено финской фирмой «Оутокумпу» в 1949 году. Основным катализатором к зарождению и развитию данной технологии плавки в Финляндии стала возможность сведения к минимуму использования сторонних источников энергии и топлива, а также возможность использования получаемой тепловой энергии [89].

Однако стоит отметить, что исследования по данному процессу проводились еще в 19 веке, первый патент на такой вид плавки был получен в 1874 году Н. Вилером (США). Также, в 1905 году, Х. Браун (США) получил патент на способ обработки во взвешенном состоянии сернистых окисленных руд с содержанием меди и различных металлов, с использованием флюсов и без них, в восстановительной и окислительной средах.

В первой половине 20 века развитием процесса взвешенной плавки занимались европейские ученые (СССР, Финляндия, Германия).

Например, В.А. Ванюковым в двухлетний период с 1930 года выполнялось множество плавков во взвешенном состоянии [89,60]. Работы выполненные профессором Ванюковым позволили определить возможность реализации процесса плавки сульфидных руд во взвешенном состоянии, в ходе работ также отмечалась высокая производительность взвешенной плавки, например, отражательная плавка имела в два раза меньшую производительность.

Основные отмеченные в ходе работ В.А. Ванюкова плюсы взвешенной плавки это: минимальный расход топлива (в 2 - 3 раза меньше чем при отражательной плавке), хорошее разделение штейна и шлака (при этом штейн содержит высокое содержание целевого металла), высокая степень десульфуризации (87 %)

Также стоит отметить, что параллельно с В. А. Ванюковым исследование процессов взвешенной плавки в СССР проводилось и в других лабораториях, например, таких как Горный институт, где Д.А. Диомидовский проводил опытные работы по переработке различных материалов [29].

Главным реактором цепочки переработки сульфидных концентратов является печь взвешенной плавки (далее ПВП). ПВП имеет высокую интенсивность плавления и состоит практически из трех самостоятельных частей: реакционная шахта, отстойник, аптейк.

Согласно технологической схеме, шихта из бункера с концентратом, подается на транспортер, куда также подается речной песок и обратная пыль, после, загрузочная смесь посредством транспортера подается в распылитель, откуда вместе с обогащенным кислородом технологическим воздухом в виде суспензии распыляется в реакционную шахту печи, где данная смесь начинает возгораться и реагировать. Объем бункера с концентратом составляет 400 м^3 .

Производительность питателя по концентрату составляет $40 \div 100 \text{ т/ч}$, при объемной плотности концентрата $= 2,2 \text{ т/м}^3$. Влажность подаваемого концентрата равняется $0,2 \%$.

Температура входящей загрузочной смеси – 50°C .

В соответствии с тепловым балансом значительное обогащение дутья кислородом до 70% позволяет вести процесс без использования дополнительного топлива.

На рисунке 84 рассмотрена конструкция печи взвешенной плавки вертикального типа. Как уже было сказано выше, печь состоит из трех агрегатов [57]:

1. Реакционная шахта, где проходят основные процессы диссоциации и окисления сульфидов, подогрев шихты и формирование капель шлаковой и донной фаз;
2. Отстойник, где проходит разделение шлак и штейна;
3. Аптейк, через который утилизируются отходящие газы.

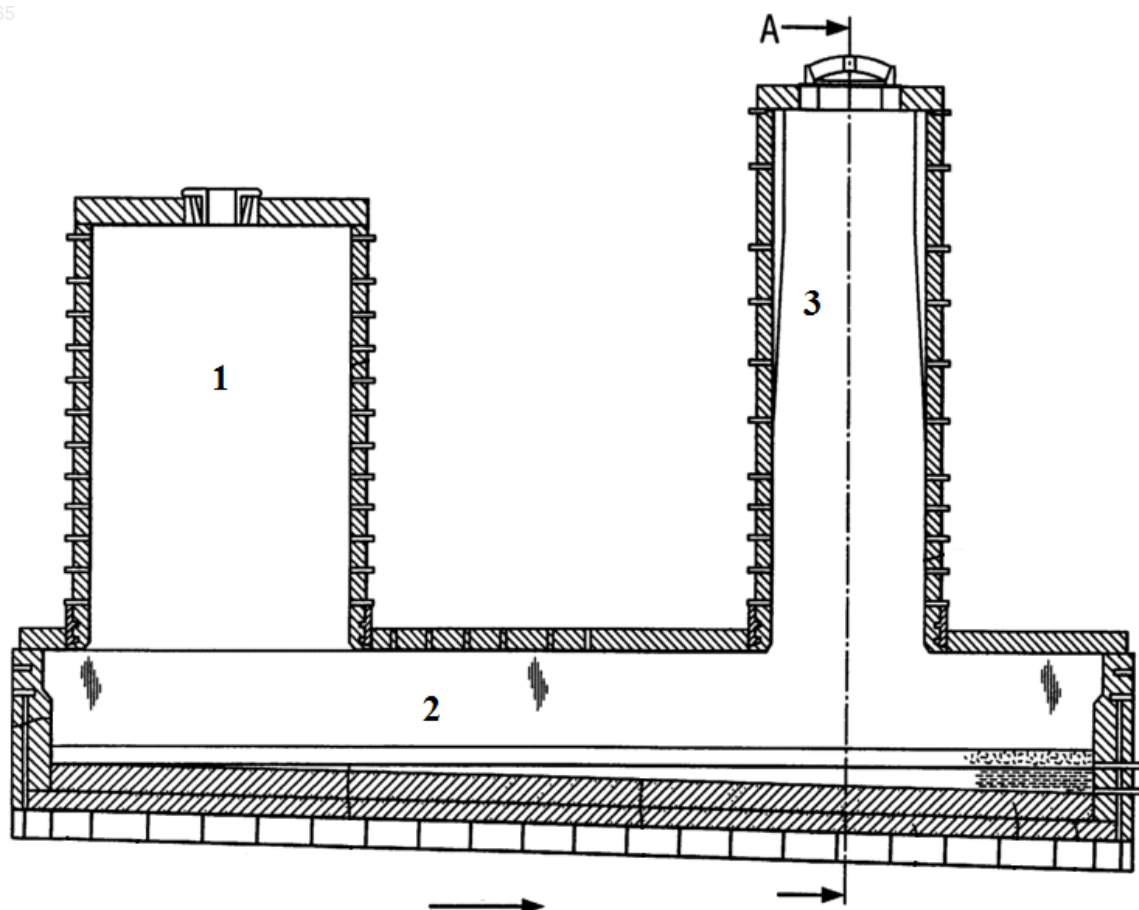


Рисунок – 84 Печь взвешенной плавки вертикального типа
где 1 – реакционная шахта, 2 – отстойник, 3 – аптейк

Реакционная шахта (далее РШ) является вертикальной камерой диаметром 8176 мм и высотой 6090 мм. Изнутри кожух РШ выполнен из огнеупорной кладки, а для контроля температурного режима в РШ сделаны места установки термопар. Контроль состояния кладки производится посредством смотровых люков.

Как уже было сказано выше, в РШ при распылении воздушно-шихтовой смеси происходят основные реакции, которые определяют состав и качество штейна и шлака.

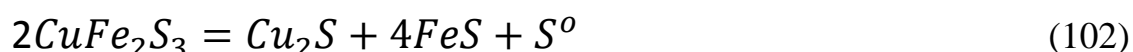
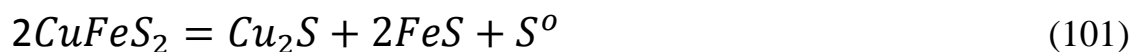
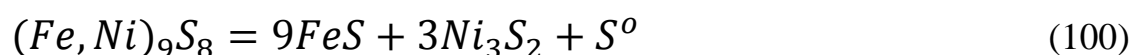
Питание печи взвешенной плавки осуществляется посредством специализированного распылителя, который позволяет регулировать скорость дутья потока КВС, при этом клапан распылителя позволяет держать расход в определенном диапазоне при различном количестве КВС [57].

Диапазон КВС выбирается таким, чтобы реакции взаимодействия концентрата и КВС проходили наиболее высокоэффективно.

После распыления частицы шихты попадают в пространство раскаленного реактора печи, где происходит воспламенение сульфидов, сам процесс плавления начинается с прогревания частиц концентрата до 600 – 650°C, при данной температуре начинают происходить реакции диссоциации, после реакций окисления сульфидов, частицы шихты падают на поверхность ванны отстойника, где происходит расслоение расплава на штейн и шлак, для поддержания определенной температуры продуктов плавки в отстойной зоне, используются горелки на природном газе. После того, как газы покидают реакционную шахту, их направление меняется на девяностой градусов, после чего поток идет горизонтально до аптейка, где направление меняется вновь. Благодаря этому, в печи взвешенной плавки происходит полное разделение сульфидно-силикатных частиц и газового потока.

Превращение сульфидов в печи взвешенной плавки протекает по следующим стадиям [57]:

- Нагрев материалов шихты;
- Диссоциация высших сульфидов в низшие сульфиды представлена следующими основными реакциями:

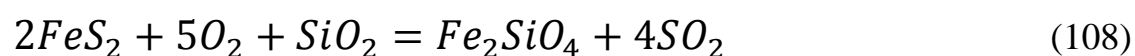
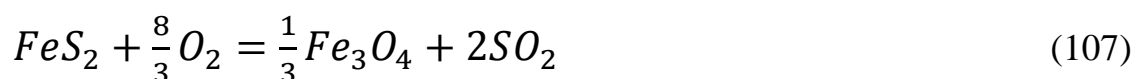
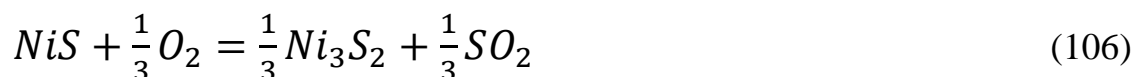
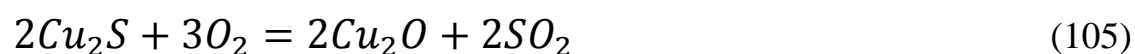
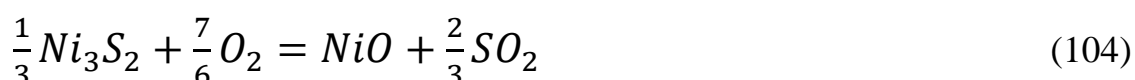


Продуктами диссоциации высших сульфидов являются низшие сульфиды, которые далее идут на частичное окисление, а после, в виде оксидов металлов переходят в шлаковое состояние. Не окислившиеся низшие сульфиды переходят в штейн.

- Нагрев и воспламенение сульфидов

В момент загрузки шихты в шахту из распылителя, температура концентрата равняется 40 – 50°C, такой температуры недостаточно для воспламенения материала, например сульфидные части воспламеняются в диапазоне с 300 до 700°C [89]

- Окисление сульфидов и серы, плавка компонентов шихты происходит по следующим реакциям:

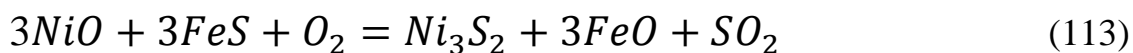
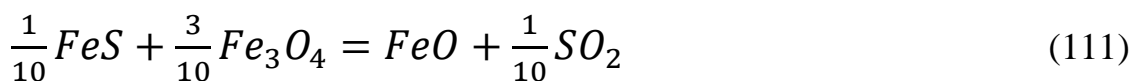


Приведенные выше реакции окисления низших сульфидов являются экзотермическими реакциями, то есть проходят с выделением значительного количества теплоты. Скорость процесса плавки при окислении сульфидов достигает своего максимума, а температура в реакторе за доли секунд достигает 1400 °C [57]. Дутье, обогащенное кислородом, позволяет ускорить процесс окисления, однако в связи с этим снижается расход общего дутья в РШ.

Из этого следует, что управление процессом взвешенной плавки никелевого концентрата можно вести с помощью распылителя шихты, а именно, изменять расход кислорода на массу концентрата. Посредством такого управления можно успешно регулировать химический состав штейна [38].

Разделение расплава на шлак и штейн происходит во второй части агрегата – отстойнике, представляющем собой горизонтальную камеру, размеры которой определяются временем пребывания и объемом шлака в печи [89, 12, 61].

Для отстойника ПВП свойственны следующие реакции:



Третья часть печи взвешенной плавки – аптейк, представляет собой газоход вертикального типа, основная задача которого это транспортировка газов из печи в котел утилизатор, где газы теряют часть пыли и охлаждаются до 300°C.

Конечной продукцией печей взвешенной плавки является штейн, шлак и технологический газ.

Никелевый штейн из печи взвешенной плавки отправляется на никелевое конвертирование для переработки до фاینштейна, шлак из печи отправляется в обеднительные печи.

Штейн ПВП представляет собой сплав сульфидов металлов и имеет следующий химический состав, представленный в таблице 8.

Таблица 8 – Химический состав штейна ПВП

Наименование продукта	Массовая доля, %					
	никель	медь	кобальт	железо	сера	диоксид кремния
Штейн ПВП	25,2-28,5	11,5- 13,6	0,65- 0,705	29,5- 31,8	26,3- 27,0	0,15-0,45

Температура штейна поддерживается в диапазоне 1150-1200 °С, а удельный вес штейна 6400 кг/м³

Вторым продуктом печи ПВП является шлак, представляющий собой сплав оксидов (FeO , Fe_3O_4 , CaO , MgO , SiO_2), состав шлака представлен в таблице 9. Значение плотности шлака находится в диапазоне 3200 – 3500 кг/м³.

Таблица 9 – Химический состав шлака ПВП

Наименование продукта	Массовая доля %					
	никель	медь	кобальт	железо	сера	диоксид кремния
Шлак ПВП	0,46-	0,31-	0,175-	42,0-	1,12-	32,0-
	0,6	0,35	0,178	44,5	1,40	34,0

5.2 Моделирование процесса взвешенной плавки никелевого концентрата

Моделирование процесса переработки никелевого концентрата проводилось в программном продукте ReactOp, позволяющем решать задачи кинетики реакций и конструкции реактора. Для моделирования реакционной шахты печи взвешенной плавки была выбрана модель реактора идеального перемешивания, учитывающая его тепловой баланс. В качестве реакций, протекающих в реакторе были выбраны основные реакции, представленные в первой части данной главы. Стоит отметить, что для более точного моделирования процесса плавки, были использованы энтальпии реакций, теплоемкости и концентрации веществ.

Для моделирования взяты следующие начальные данные:

1. $F_{(\text{концентрата})} = 252,53 \text{ т/ч}$;
2. $\rho_{(\text{концентрат})} = 2200 \text{ кг/м}^3$;
3. Состав концентрата: пирротин Fe_7S_8 – 48,9%, пентландит $Fe_4Ni_4S_8$ – 24,5%, кубанит $CuFe_2S_3$ – 8%, халькопирит $CuFeS_2$ – 7,5%, другие примеси – 11,1%;
4. $F_{(\text{квс})} = 59\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$;
5. Обогащение кислородом – 70%;
6. $F_{(\text{флюса})} = 182,5 \text{ кг/т}$;
7. Состав флюса: SiO_2 – 80%, MgO – 1,5%, Al_2O_3 – 8,7%, CaO – 1,3%, FeO – 2,5%;

Расчет энтальпии каждой из реакций взвешенной плавки производился по формуле Кирхгофа (зависимость энтальпии реакции от температуры). Также использовалось положение об определении энтальпии реакции по разности теплосодержаний конечного и начального состояния системы, данное положение было экспериментально доказанное профессором Горной академии Санкт-Петербурга Г.И. Гессом в 1821 году [2].

Таким образом, для расчета теплового эффекта необходимо рассчитать разность между энтальпиями продуктов реакции и энтальпиями реагентов, с учетом стехиометрических коэффициентов:

$$\Delta_r H = \sum_{\text{продукты}} \nu_i \Delta_f H(i) - \sum_{\text{реагенты}} \nu_i \Delta_f H(i) \quad (114)$$

Зависимость энтальпии реакции от температуры описывается формулой Кирхгофа, которая в свою очередь определяется из выражения изобарной теплоемкости вещества:

$$C_p = \frac{dH}{dT} \quad (115)$$

Зависимость (115) характеризуется количество теплоты, необходимое для того, чтобы нагреть один градус вещества. Для определения энтальпии, необходимо выразить ее из (115) и проинтегрировать. Следующее выражение является формулой Кирхгофа и показывает зависимость энтальпии вещества от температуры [2]:

$$H(T) = H(T_0) + \int_{T_0}^T C_p dT \quad (116)$$

где $H(T)$ – энтальпия вещества при определенной температуре, $H(T_0)$ – энтальпия вещества при стандартной температуре в 298 К (табличное значение), C_p – теплоемкость вещества в зависимости от температуры (табличное значение).

Для определения зависимости теплоемкости вещества от температуры принято использовать уравнение Майера-Келли, коэффициенты которого определены расчетно или экспериментально для каждого вещества [Н.Н.Акинфиев, Епифанова]:

$$C_p = a + bT - \frac{c}{T^2} \quad (117)$$

Энтальпия реакции рассчитывается с учетом изменения величин выражения (116). По положению Гесса находится энтальпия реакции при стандартной температуре, также с учетом стехиометрическим коэффициентов рассчитывается изменение теплоемкости:

$$\Delta_r H(T) = \Delta_r H(T_0) + \int_{T_0}^T \Delta_r C_p dT \quad (118)$$

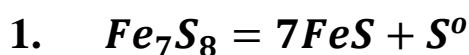
В таблице 10 представлены справочные данные по стандартным энтальпиям образования и по температурным коэффициентам уравнения теплоемкости веществ, участвующих в реакциях ПВП [25, 115]. В связи с отсутствием достоверной информации в исследуемых литературных источниках о температурных коэффициентах высших сульфидов, а также в связи незначительным влиянием температуры, данными коэффициентами было решено пренебречь.

Таблица 10 – Энтальпия образования веществ, температурные коэффициенты

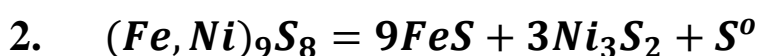
Вещество	ΔH^0_{298} , кДж/моль	Теплоемкость Дж/(моль К)		
		Коэффициенты уравнения $C_p = f(T)$		
		a	$b * 10^{-3}$	$c * 10^{-5}$
Fe_7S_8	- 749,80	-	-	-
$(Fe, Ni)_9S_8$	- 1506,80	-	-	-
$CuFe_2S_3$	- 285,77	-	-	-
$CuFeS_2$	- 190,37	-	-	-
FeS_2	- 177,40	74,81	5,52	-12,76
FeS	- 95,40	71,18	-	-
Ni_3S_2	- 198,87	38,73	53,59	-
NiS	- 92,95	38,73	9,25	-
Cu_2S	- 82,01	84,98	-	-
CuS	- 50,66	44,37	11,05	-
S	-	36,11	1,09	-3,52
FeO	- 263,68	52,80	6,24	-3,10

<i>NiO</i>	- 239,80	-20,88	157,23	16,28
<i>Cu₂O</i>	-167,36	62,34	23,85	-
<i>Fe₃O₄</i>	- 1117,71	167,03	78,91	-41,82
<i>Fe₂SiO₄</i>	- 1478,00	-	-	-
<i>O₂</i>	0	31,46	3,39	-3,77
<i>SiO₂</i>	- 859,30	46,94	34,31	-11,30
<i>SO₂</i>	- 296,90	42,55	12,55	-5,65

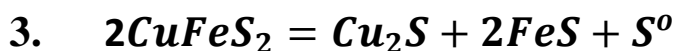
Расчет энтальпии для реакций диссоциации серы (650°C), на основе таблицы 10, представлен ниже [2].



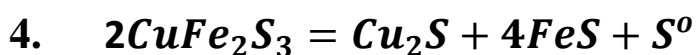
$$\Delta_r H^0_{298} = 7(-95,40) - (-749,80) = 82 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$



$$\Delta_r H^0_{298} = 9(-95,40) + 3(-198,87) - (-1506,80) = 51,59 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

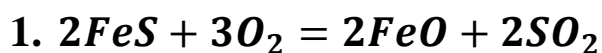


$$\Delta_r H^0_{298} = (-82,01) + 2(-95,40) - 2(-190,37) = 82,44 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$



$$\Delta_r H^0_{298} = (-82,01) + 4(-95,40) - 2(-285,77) = 107,93 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

Расчет энтальпии для реакций окисления сульфидов (T=1200°C), на основе таблицы 10, представлен ниже [2].



$$\Delta_r H^0_{298} = 2(-263,68) + 2(-296,9) - 2(-95,40) = -930,36 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

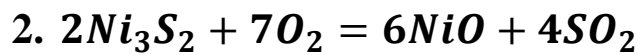
$$\Delta_r H(T) = -930,36 + \Delta_r a(1473 - 298) + \frac{1}{2} \Delta_r b(1473^2 - 298^2) + \Delta_r c \left(\frac{1}{1473} - \frac{1}{298} \right);$$

$$\Delta_r a = (52,8 \cdot 2 + 42,5 \cdot 2 - (71,18 \cdot 2 + 31,46 \cdot 3)) = -46,04;$$

$$\Delta_r b = (6,24 \cdot 2 + 12,55 \cdot 2 - (0 \cdot 2 + 3,39 \cdot 3)) \cdot 10^{-3} = 0,0274;$$

$$\Delta_r c = (-3,10 \cdot 2 - 5,65 \cdot 2 - (0 \cdot 2 - 3,77 \cdot 3)) \cdot 10^5 = -619000;$$

$$\Delta_r H(T) = -930360 \pm 46,04(1473 - 298) + \frac{1}{2} 0,0274(1473^2 - 298^2) - 619000 \left(\frac{1}{1473} - \frac{1}{298} \right) = -954281 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$



$$\Delta_r H^0_{298} = 6(-239,80) + 4(-296,9) - 2(-198,87) = -2228,66 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

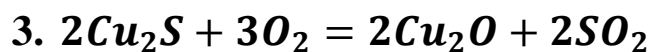
$$\Delta_r H(T) = -2228,66 + \Delta_r a(1473 - 298) + \frac{1}{2} \Delta_r b(1473^2 - 298^2) + \Delta_r c \left(\frac{1}{1473} - \frac{1}{298} \right);$$

$$\Delta_r a = 124,42;$$

$$\Delta_r b = 0,06391;$$

$$\Delta_r c = -1481000;$$

$$\Delta_r H(T) = -2012006 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$



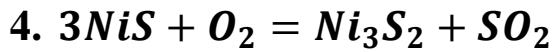
$$\Delta_r H^0_{298} = 2(-167,36) + 2(-296,9) - 2(-82,01) = -764,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

$$\Delta_r a = -46,04;$$

$$\Delta_r b = 0,02741;$$

$$\Delta_r c = -619000;$$

$$\Delta_r H(T) = -788421 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$



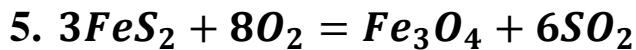
$$\Delta_r H^0_{298} = -216,92 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

$$\Delta_r a = -66,37;$$

$$\Delta_r b = 0,035;$$

$$\Delta_r c = -188000;$$

$$\Delta_r H(T) = -257985 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$



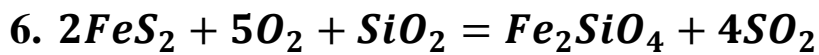
$$\Delta_r H^0_{298} = -2366,91 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

$$\Delta_r a = -53,78;$$

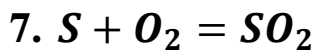
$$\Delta_r b = 0,11053;$$

$$\Delta_r c = -728000;$$

$$\Delta_r H(T) = -2313150 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$



$$\Delta_r H(T) = -1274100 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$



$$\Delta_r H^0_{298} = -296,90 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}};$$

$$\Delta_r a = -25,02;$$

$$\Delta_r b = 0,00807;$$

$$\Delta_r c = 164000;$$

$$\Delta_r H(T) = -318341 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}};$$

Расчет массового расхода каждого из компонентов концентрата представлен ниже, в основе расчета производственные данные по расходам основных компонентов:

1. $F_{\text{пирротин}} = 252,53 \text{ т/ч} \cdot 0,489 = 123,48 \text{ т/ч};$
2. $F_{\text{пентландит}} = 252,53 \text{ т/ч} \cdot 0,245 = 61,87 \text{ т/ч};$
3. $F_{\text{кубанит}} = 252,53 \text{ т/ч} \cdot 0,08 = 20,20 \text{ т/ч};$
4. $F_{\text{халькопирит}} = 252,53 \text{ т/ч} \cdot 0,075 = 18,94 \text{ т/ч};$

Расчет мольного потока каждого из компонентов концентрата на основе молярной массы соединений:

1. $F_{M_{\text{пирротин}}} = 123480 \text{ кг/ч} \div 647,44 \text{ кг/кмоль} = 190,72 \text{ кмоль/ч};$
2. $F_{M_{\text{пентландит}}} = 61870 \text{ кг/ч} \div 1957,63 \text{ кг/кмоль} = 31,60 \text{ кмоль/ч};$
3. $F_{M_{\text{кубанит}}} = 20200 \text{ кг/ч} \div 542,86 \text{ кг/кмоль} = 37,21 \text{ кмоль/ч};$
4. $F_{M_{\text{халькопирит}}} = 18940 \text{ кг/ч} \div 367,04 \text{ кг/кмоль} = 51,60 \text{ кмоль/ч};$

Расчет массового расхода каждого из компонентов КВС, обогащенного кислородом на 70%:

1. $F_{\text{квс}} = 59000 \text{ нм}^3/\text{ч};$
 $\rho_{\text{кислорода}} = 1,43 \text{ кг/м}^3;$
 $\rho_{\text{азота}} = 1,251 \text{ кг/м}^3;$
 $\rho_{\text{квс}} = 1,376 \text{ кг/м}^3;$
 $F_{\text{квс}} = 59000 \text{ нм}^3/\text{ч} \cdot 1,376 \text{ кг/м}^3 = 81201,7 \text{ кг/ч}.$
2. $F_{\text{кислорода}} = 81201,7 \text{ кг/ч} \cdot 0,70 \% = 56841,2 \text{ кг/ч};$
3. $F_{\text{азота}} = 81201,7 \text{ кг/ч} \cdot 0,30 \% = 24360,5 \text{ кг/ч}.$

Расчет мольного потока расхода кислорода в питании КВС:

1. $F_{M_{\text{кислорода}}} = 56841,2 \text{ кг/ч} \div 31,99 \text{ кг/кмоль} = 1776,84 \text{ кмоль/ч};$

Расчет массового расхода компонентов флюса на основе состава и расхода:

$$1. F_{\text{флюса}} = 252,53 \text{ т/ч} \cdot 182,5 \text{ кг/т} = 46086,73 \text{ кг/ч};$$

$$2. F_{\text{SiO}_2} = 46086,73 \text{ кг/ч} \cdot 0,80 \% = 36869,38 \text{ кг/ч};$$

Расчет молярного расхода каждого из компонентов флюса:

$$1. F_{M_{\text{SiO}_2}} = 36869,38 \text{ кг/ч} \div 60,08 \text{ кг/кмоль} = 613,67 \text{ кмоль/ч};$$

Исходя из полученных данных, был получен объемный расход загрузочной смеси.

$$1. V_{\text{общ}} = V_{\text{конц}} + V_{\text{квс}} + V_{\text{флюса}} = 114,79 \text{ м}^3/\text{ч} + 59000 \text{ м}^3/\text{ч} + 32,83 \text{ м}^3/\text{ч} = 59147,71 \text{ м}^3/\text{ч};$$

На основе объемного расхода рассчитаны концентрации всех компонентов в смеси:

$$1. C_{\text{пиротин}} = 0,178 \text{ кмоль/м}^3;$$

$$2. C_{\text{пентландит}} = 0,107 \text{ кмоль/м}^3;$$

$$3. C_{\text{кубанит}} = 0,0755 \text{ кмоль/м}^3;$$

$$4. C_{\text{халькопирит}} = 0,052 \text{ кмоль/м}^3;$$

$$5. C_{\text{кислород}} = 1,802 \text{ кмоль/м}^3;$$

$$6. C_{\text{SiO}_2} = 0,62 \text{ кмоль/м}^3;$$

С помощью программного пакета ReactOp создана математическая модель печи взвешенной плавки. При создании модели использовались реакции диссоциации высших сульфидов и реакции окисления низших сульфидов.

На рисунке 85 представлено стандартное окно разработки модели в ReactOp. Данное окно подразделено на две области: запись химических реакций протекающих в печи процессов; свойства введенных реакций. В свойствах реакций использованы рассчитанные выше параметры по энтальпии. Также на основании модели сжимающегося ядра определен показатель степени реакции, для сульфидов $n = 2/3$. Порядок степени реакции для оксидов определен по

скорости массопередачи. Значения $\ln(K_0)$ и E , определяют значение скорости протекания реакции и получены из химических справочников.

Chemical Equations:

- $3\text{Fe}_4\text{Ni}_4\text{S}_8 \rightarrow 12\text{FeS} + 4\text{Ni}_3\text{S}_2 + 4\text{S}$
- $\text{Fe}_7\text{S}_8 \rightarrow 7\text{FeS} + \text{S}$
- $2\text{CuFe}_2\text{S}_3 \rightarrow \text{Cu}_2\text{S} + 4\text{FeS} + \text{S}$

Name	Value
$\ln(K_0)$, [min]	20
E , kJ/mol	40
$(-H)$, kJ/kmol	-51590
$n(\text{Fe}_4\text{Ni}_4\text{S}_8)$, dimless	0.67

Calculated Values at Temperature: K

$K_0 = 4.85165\text{E}008$ $K(T) = 2898.93$

Рисунок 85 – Окно разработки модели реактора взвешенной плавки

С помощью специализированной функции ReactOp – Simulation были проведены испытания разработанной математической модели.

Для адекватной работы модели в ReactOp был задан температурный профиль процесса плавки.

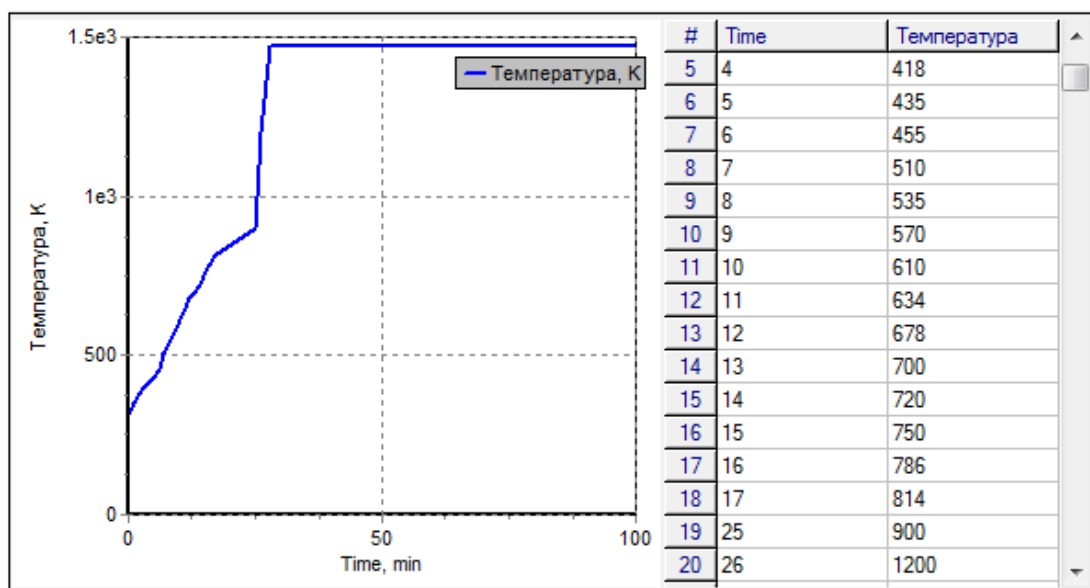


Рисунок 86 – Температурный профиль процесса плавки

Результаты работы модели, содержание оксидов и сульфидов металлов в расплаве, представлены ниже.

Высшие сульфиды концентрата, такие как пирит, пентландит, кубанит, халькопирит диссоциируют по представленным выше реакциям в низшие сульфиды, их концентрация уменьшается в ходе процесса плавки. На примере диссоциации пентландита, представленные ниже рисунки, показывают потери высших сульфидов в ходе процесса:

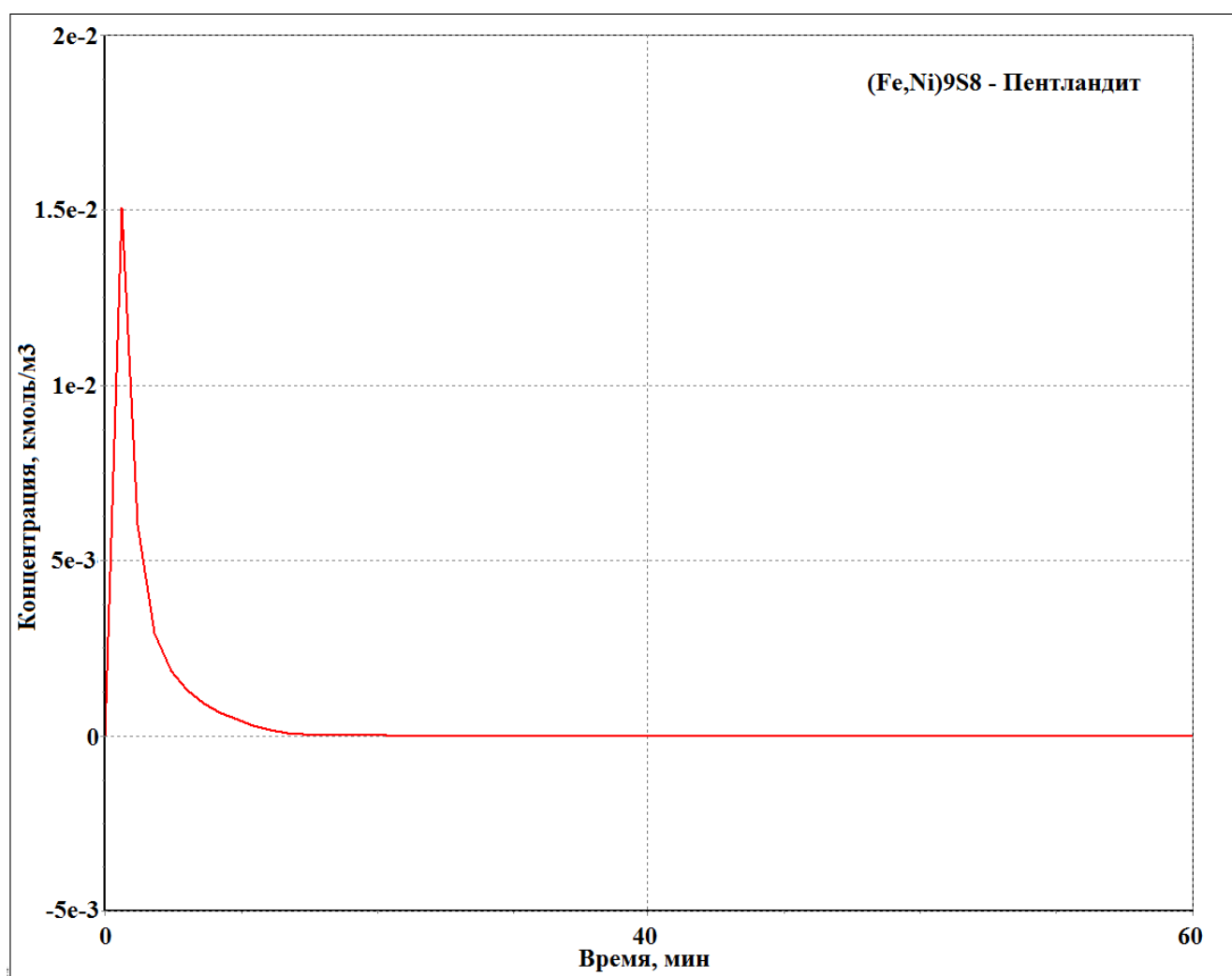


Рисунок 87 – Изменение концентрации пентландита во времени

Реакции окисления происходят с выделением SO_2 и образованием оксидов металлов. Динамика изменения концентрации оксидов металлов (FeO , NiO , Cu_2O), на примере оксида никеля, представлена на рисунке 88.

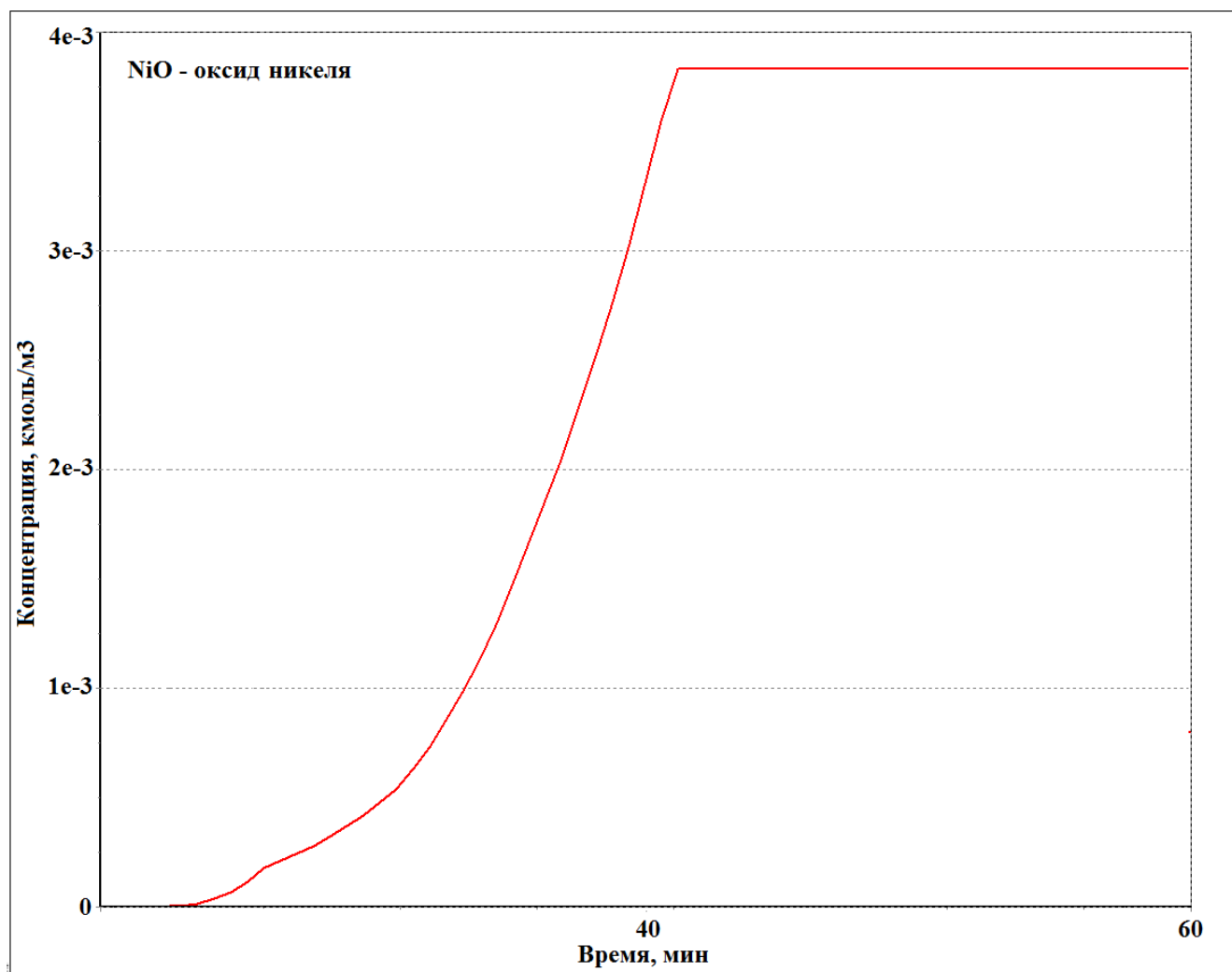


Рисунок 88 – Изменение концентрации пентландита во времени

После диссоциации пентландита до низших сульфидов, происходит окисление Ni_3S_2 до NiO , согласно рисунку 88 концентрация оксида возрастает в ходе процесса плавки.

Также рассмотрена динамика изменения концентрации сульфидов, на примере Ni_3S_2 . Согласно рисунку 89, в ходе процесса плавки образуется Ni_3S_2 , концентрация которого в ходе процесса уменьшается при образовании оксидов металлов.

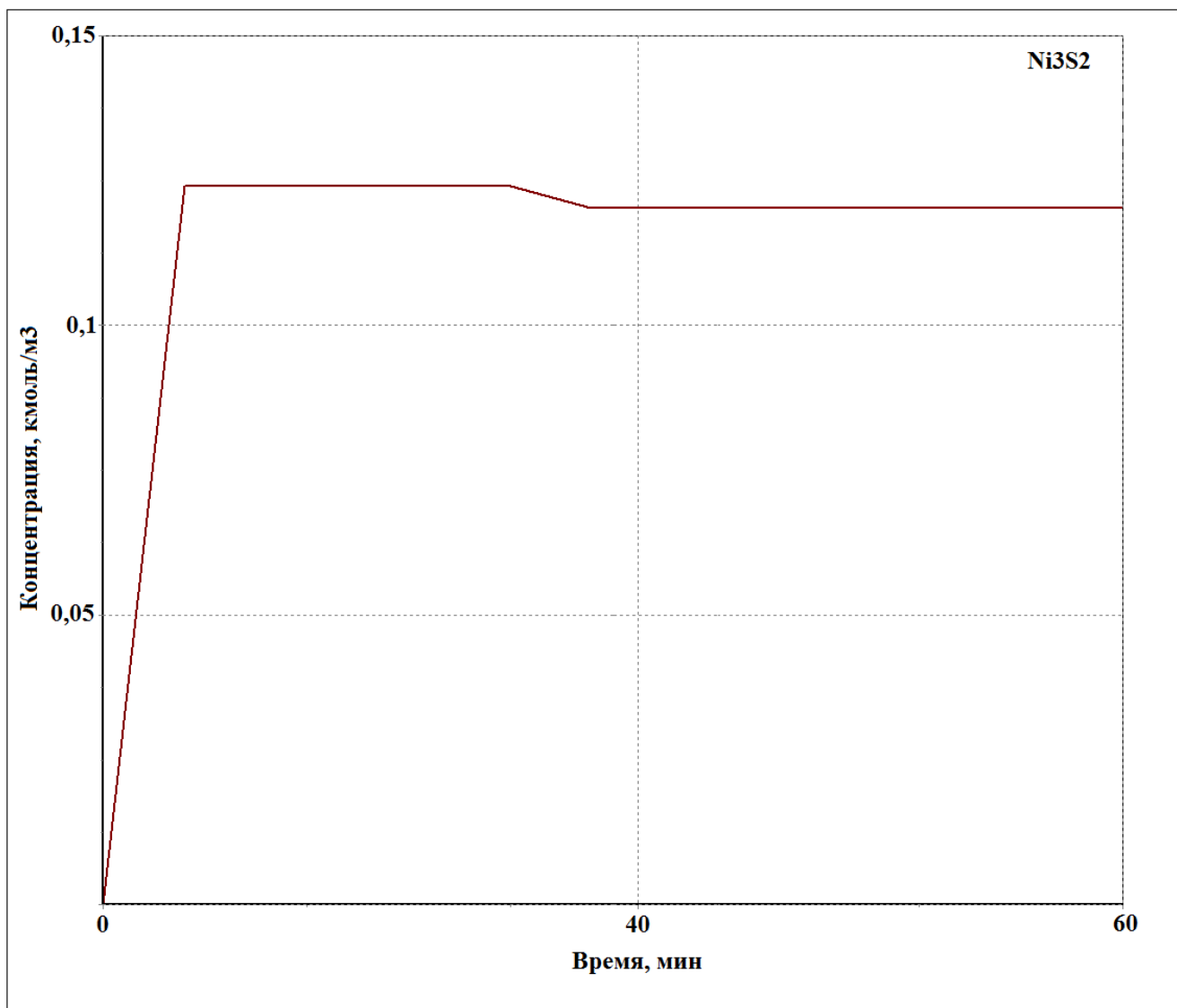


Рисунок 89 – Изменение концентрации сульфида меди во времени

В ходе моделирования процесса взвешенной плавки никелевых концентратов была получена модель, основанная на химических реакциях, протекающих в реакторе печи, за основу был принят реактор идеального перемешивания с учетом поглощения и выделения тепловой энергии.

На основе данной модели были получены несколько срезов статистических данных, для чего, посредством изменения дутья кислорода и расхода шихты в печь, наблюдалось изменение состава расплава.

На рисунке 90 представлены конечные концентрации основных веществ, участвующих в процессе.

Integral Responses	Value
Cu ₂ O, kmol/m ³	0.0022891
Cu ₂ S, kmol/m ³	0.0613609
CuFe ₂ S ₃ , kmol/m ³	-5.300535E-009
CuFeS ₂ , kmol/m ³	2.786877E-009
Fe ₂ SiO ₄ , kmol/m ³	-2.642156E-010
Fe ₃ O ₄ , kmol/m ³	-3.63962E-010
Fe ₄ Ni ₄ S ₈ , kmol/m ³	-4.222549E-009
Fe ₇ S ₈ , kmol/m ³	-8.372289E-008
FeO, kmol/m ³	0.02255529
FeS, kmol/m ³	1.865745
FeS ₂ , kmol/m ³	1.620317E-009
Ni ₃ S ₂ , kmol/m ³	0.1426384
NiO, kmol/m ³	0.01208473
NiS, kmol/m ³	1.745355E-009
O ₂ , kmol/m ³	1.746721
S, kmol/m ³	0.3844034
SiO ₂ , kmol/m ³	0.62
SO ₂ , kmol/m ³	0.03681428
Heat, kJ/m ³	1.726563E007

Steady-state solution is not achieved

Done Help

Рисунок 90 – Конечные концентрации веществ, участвующих в процессе плавки

Изменение тепловой энергии во времени показывает уменьшение своего значения в начале процесса, это происходит в связи с наличием эндотермических реакций диссоциации высших сульфидов. Далее тепловая энергия процесса возрастает за счет протекания экзотермических реакций окисления низших сульфидов, процесс происходит без дополнительного источника энергии.

5.3 Разработка системы автоматизации процесса плавки никелевого концентрата

Для разработки системы автоматизации, а также для оценки ее работы использовался программный пакет Proficy CSense, с помощью которого генерировались управляющие воздействия и отслеживалась целевая функция процесса. В качестве модели печи взвешенной плавки использовалась модель, полученная в среде ReactOp.

Основная цель печи взвешенной плавки – это переработка сульфидного никелевого концентрата на штейн и шлак, с определенным извлечением металлов. Печь подразделяется на реакционную (зона тепло генерации) и технологическую зоны.

В данной диссертационной работе в ходе моделирования в предыдущей части главы рассмотрена зона теплогенерации, на ее основе выполнена система автоматизированного управления.

Для управления зоной теплогенерации требуется контроль множества параметров, таких как расход КВС, расход кислорода, расход шихты, температура реакционной шахты, состав штейна, состав шлака.

Управление процессом взвешенной плавки выполняется двумя способами: расход обогащенного дутья, позволяющий регулировать температуру РШ при возможном изменении состава штейна; расход загружаемой шихты.

Регулировка состава штейна производится с помощью поддержания отношения «загрузки шихты – расход дутья». В случае нарушения оптимального соотношения, происходит переокисление шлака.

При использовании разработанной системы управления процессом сгущения медно-никелевых концентратов происходит значительное уменьшение возмущения по колебанию состава никелевого концентрата, подаваемого на обжиг в печь.

Основными параметрами процесса взвешенной плавки никелевых концентратов является температура и состав штейна (содержание извлекаемых

металлов). По составу штейна ведется контроль концентрации Ni, Cu, Fe, по шлаку ведется контроль содержания в нем флюса и оксида железа.

Помимо расхода дутья и расхода шихты, процесс извлечения можно регулировать изменением количества песчаника в питании печи.

Большой расход кислорода на массу шихты способствует более долгому окислению и переводу в шлак железа, что позволяет получить высокое содержание никеля в штейне. Меньший расход кислорода на массу шихты, наоборот, приводит к более бедным штейнам.

Регулирование состава шлака по диоксиду кремния ведется за счет изменения содержания песчаника в питании печи, чем больше песчаника в шихте, тем богаче штейн.

С помощью программного продукта ReactOp были проведены испытания на определение зависимости содержания веществ в расплаве от изменения входных потоков. Для этого были поочередно изменены входные потоки по шихте, кислороду и песчанику.

На рисунке 91 представлена динамика изменения концентрации Ni_3S_2 при уменьшении расхода подаваемой в печь взвешенной плавки шихты на 22 т/ч.

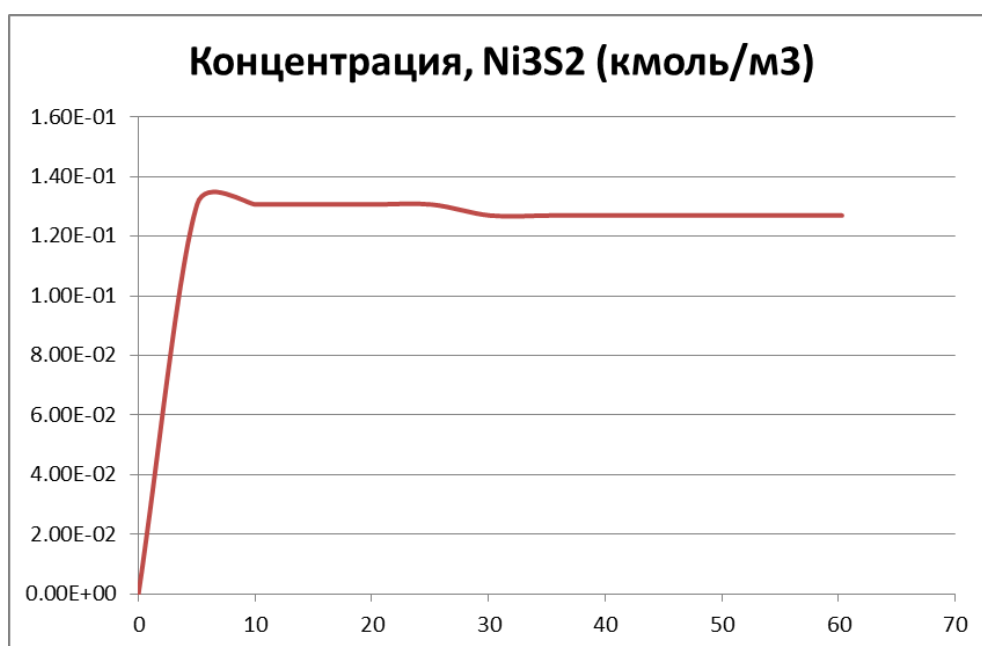


Рисунок 91 – Изменение концентрации Ni_3S_2 при уменьшении количества подаваемой шихты

Конечное значение концентрации $\text{Ni}_3\text{S}_2 = 0,1269$ кмоль/ м^3 , тогда как при начальных данных, конечная концентрация $\text{Ni}_3\text{S}_2 = 0,1426$ кмоль/ м^3

На рисунке 92 представлена динамика изменения концентрации Ni_3S_2 , при увеличении подачи дутья с 59 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ до 70 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$.

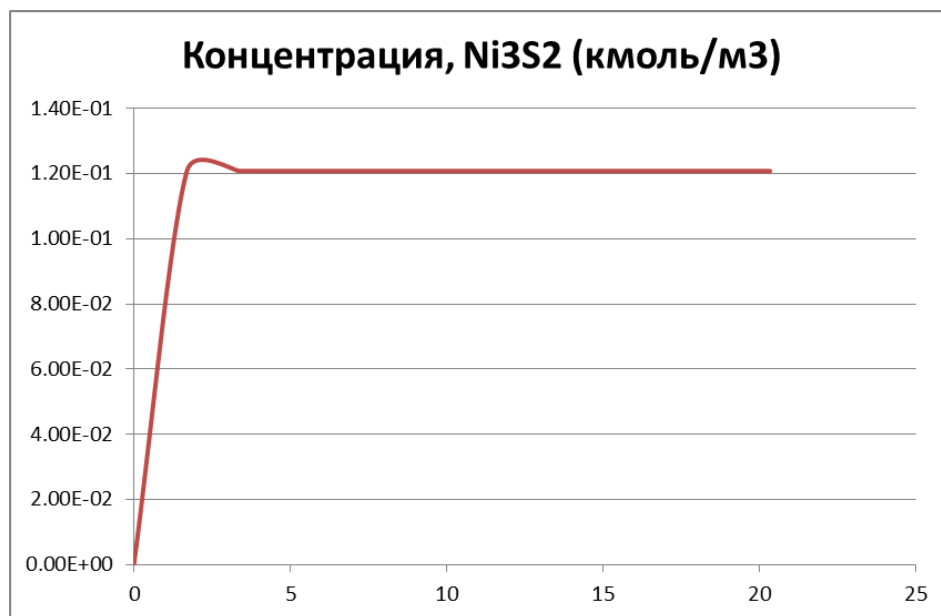


Рисунок 92 – Изменение концентрации Ni_3S_2 при увеличении дутья на тонну шихты

Конечное значение концентрации $\text{Ni}_3\text{S}_2 = 0,12$ кмоль/ м^3 , тогда как при начальных данных, конечная концентрация $\text{Ni}_3\text{S}_2 = 0,1426$ кмоль/ м^3

После проведения исследования процесса взвешенной плавки никелевых концентратов был сделан вывод о том, что система управления должна решать следующие задачи:

1. Управление входными потоками;
2. Стабилизация их соотношения.

Автоматизированному контролю подвергаются следующие узлы печи взвешенной плавки:

- Регулирование извлечения никеля в штейне;
- Регулирование подачи шихты;
- Регулирование дутья КВС;
- Регулирование подачи песчаника;

- Контроль температурных параметров печи;
- Контроль температурных параметров отходящих газов.

Система автоматизации имеет следующие функции:

- Контроль работы и состояния оборудования (электродвигатели, температурные датчики, расходомеры);
- Стабилизация извлечения никеля;
- Отслеживание аварийных и предупредительных ситуаций;
- Контроль расхода питающих потоков печи ВП.

Для управления контрольно-измерительными приборами нижнего уровня выбран ПЛК PAC System RX3i от компании GE, контроллер обеспечивает следующие функции:

- Дискретное управление клапанами;
- Аналоговое управление частотными преобразователями ленточного конвейера;
- Получение информации с аналоговых датчиков 4 – 20 мА и дальнейшее ее преобразование к инженерным величинам;
- Получение информации с дискретных датчиков;
- Генерирование тревог производственного процесса;
- Связь со SCADA системой.

Для отображения информации о ходе процесса обжига используется SCADA система Proficy Simplicity от GE, которая обеспечивает следующие функции:

- Отображение мнемосхемы процесса в виде потоков и аппаратов;
- Отображение значений измеряемых величин процесса;
- Доступ оператора к удаленному управлению исполнительными механизмами;
- Отображение аварийных и предупредительных сигналов;
- Архивирование данных производственного процесса в БД.

Для использования в структурной схеме системы автоматизации прогнозирующего регулятора, используется аналогичная схема контрольно-технических средств, разработанная для обжига никелевых концентратов в печи кипящего слоя.

В состав КТС входят следующие элементы:

- ПЛК GE PACSystem RX3i (основной, резервный);
- Технологический сервер управления процессом (основной, резервный);
- Технологический сервер базы данных;
- Технологический сервер, оснащенный прогнозирующим регулятором;
- КИП и А.

В качестве локальных средств КИП и А используется следующее оборудование:

- Пирометры спектрального отношения (бесконтактные);
- Термопары;
- Расходомеры (для контроля подаваемого концентрата в печь).

В качестве пирометров для измерения температуры штейна и шлака планируется использование пирометра «Термоконт – ТЦ4П». Назначение данного пирометра - измерение и контроль температуры металлов при плавке и в печах. Диапазон измеряемых температур – 600-1800 °С, диапазон рабочих температур – 0-40 °С. Относительная основная погрешность измерений $\pm 0,3 \%$. Интерфейс связи с ПЛК – RS-232.

В качестве расходомера для учета КВС был выбран расходомер Rosemount 3051SFC на базе диафрагм Rosemount 405. Температура измеряемой среды варьируется от -40 до 454 °С. Возможное избыточное давление в трубопроводе – 10 Мпа. Основная относительная погрешность измерений расхода $\pm 0,7 \%$. Выходной сигнал 4-20 мА.

В качестве расходомера для никелевого концентрата был выбран расходомер электромагнитный SITRANS FM Transmag 2, с диапазоном скорости потока 0,1-12 м/с. Погрешность при измерении расхода, составляет $\pm(0,5+0,12/v)$

%, где v – скорость потока. На модуль аналогового ввода ПЛК приходит сигнал 4 – 20 мА.

В качестве термопар планируется использовать хромель-алюмелевые термопары с диапазоном измерения 0 – 1300°C, сигнал с которых напрямую подается на модуль аналогового ввода, в настройках которого существует возможность выставить прием сигнала с термопар (4-20 мА). Погрешность измерений термопары составляет $\pm 0,5^\circ\text{C}$ до $\pm 1^\circ\text{C}$, зависимость выходного сигнала от температуры – линейная.

Для определения состава продуктов плавки необходим периодический пробоотбор, позволяющий проводить анализ процесса взвешенной плавки.

Программируемый логический контроллер подобран в конфигурации, рассмотренной в главе 2.

Автоматизированная система управления процессом переработки никелевого концентрата в печи взвешенной плавки строится с дополнением прогнозирующей моделью, созданной в Proficy Troubleshooter на основе статистических данных.

Сервер прогнозирующего управления печью взвешенной плавки работает на основе программного продукта, входящего в пакет Proficy CSense – Action Object Manager [114]. В данном продукте функционирует статистическая модель процесса взвешенной плавки никелевого концентрата, а также оптимизационные блоки, управляющие концентрацией дисульфида триникеля и соотношениями «расход шихты - расход дутья», «расход шихты - расход песчаника». Возмущением процесса выступает состав концентрата.

Для получения статистических данных по процессу взвешенной плавки никелевых концентратов использовалась модель, созданная в программном продукте ReactOp.

Данные в дальнейшем были обработаны в Proficy Troubleshooter, а затем экспортированы в Proficy Architect.

Помимо экспертных данных, внедренных в созданную модель, к процессу была применена нелинейная оптимизация управления концентрацией дисульфида триникеля и соотношений «расход шихты – расход дутья», «расход шихты – расход песчаника». В Proficy Architect сгенерированы три модели, каждая из которых имеет собственную целевую функцию (1 – концентрация Ni_3S_2 , 2 – соотношение «расход шихты – расход дутья», 3 – соотношение «расход шихты – расход песчаника»).

Блок оптимизации концентрации:

- Критерий оптимизации: модуль (Выход модели – 113,5) $\rightarrow \min$;
- Управляющее воздействие – Flow_Conc (Поток концентрата в печь).

Блок оптимизации дутья КВС:

- Критерий оптимизации: модуль (Объем_КВС/Объем_Концентрата – 610) $\rightarrow \min$;
- Управляющее воздействие – Flow_KVS (Поток КВС в печь). Управляющему воздействию задаются необходимые границы, для поддержания температуры в РШ.

Блок оптимизации подачи шихты:

- Критерий оптимизации: модуль (Расход_песчаника/Расход_Концентрата – 0,072) $\rightarrow \min$;

Управляющее воздействие – Flow_SiO2 (Поток песчаника в печь).

С помощью блоков оптимизации моделей процесса взвешенной плавки, была достигнута определенная концентрация содержания дисульфида триникеля в штейне посредством изменения основных управляющих сигналов, при этом, было выдержано значение соотношений расходов КВС и песчаника на тонну шихты. Регулирование происходило на основе знаний, заложенных в модель печи взвешенной плавки.

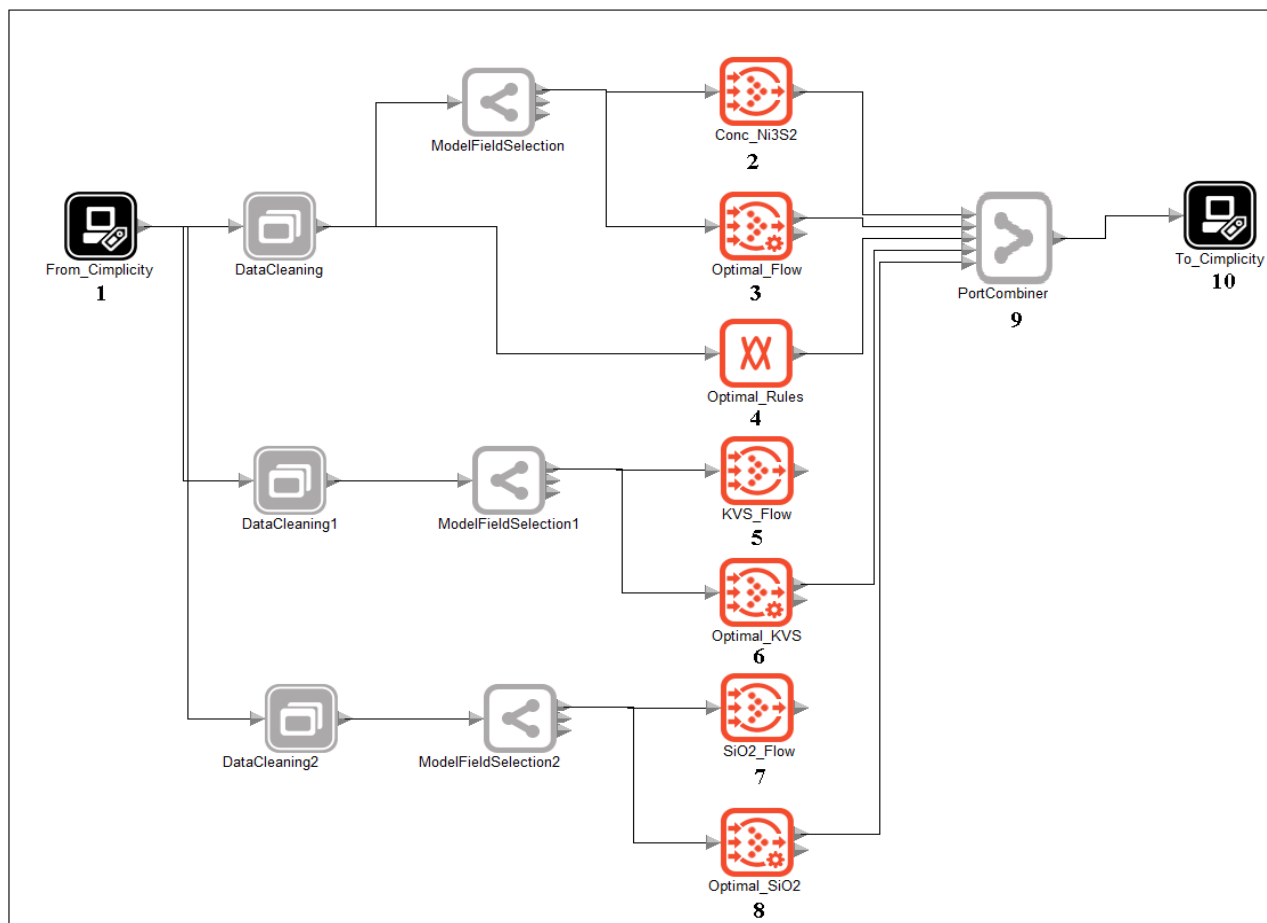


Рисунок 93 – Модель процесса плавки с оптимизационным регулятором

где 1 – входные данные (ОПС), 2 – модель концентрации Ni_3S_2 , 3 –

оптимизация потока шихты, 4 – экспертные правила, 5 – модель потока КВС, 6 – оптимизация потока КВС, 7 – модель потока песчаника, 8 – оптимизация потока песчаника, 9 – блок объединения, 10 – выходные данные (ОПС)

Для передачи информации между сервером Proficy Simplicity и сервером прогнозирующего управления, в Proficy Architect были добавлены OPC блоки передачи данных.

Работа прогнозирующего регулятора позволяет стабилизировать значение извлечения никеля в штейне посредством управления расходом шихты и дутья КВС.

В данной главе был рассмотрен процесс переработки сульфидного никелевого концентрата в печи взвешенной плавки.

В программной среде ReactOp была создана модель реакционной шахты, основанная на протекающих в ней реакциях и тепловых эффектах, используя эту модель, были сгенерированы массивы статистических данных процесса плавки.

Вследствие проведенного исследования, было предложено использовать расход шихты, КВС, песчаника, в качестве управляющих воздействий.

В Proficy Architect был синтезирован оптимизационный регулятор, позволяющий значительно улучшить качество ведения процесса, за счет прогнозирующего регулирования целевого параметра, а именно – извлечение никеля.

Также в данной главе была создана автоматизированная система управления процессом плавки никелевого концентрата на основе регулятора с прогнозирующей моделью.

Результаты работы системы управления представлены на рисунке 94, согласно которому, концентрация дисульфида триникеля имеет установившееся значение на отметке уставки, колебания параметра отсутствуют.



Рисунок 94 – Результаты работы оптимизационного регулятора концентрации Ni_3S_2
 где 1 – регулируемая величина, 2 – расход шихты, 3 – расход КВС, 4 – архивные данные

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы было проведено изучение процессов сгущения медно-никелевых концентратов и процессов переработки никелевых концентратов, а также их статистическая обработка. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Автоматизированная система параллельного управления загрузкой и разгрузкой сгустителей для процесса сгущения медно-никелевых концентратов позволяет стабилизировать плотность на выходе передела сгущения до 0,05 т/м³. Стабильное значение плотности медно-никелевого концентрата после передела сгущения позволяет получать выходной концентрат с высоким постоянным содержанием никеля, что, в свою очередь, уменьшает материальные затраты на расход реагентов и электроэнергию. Также стабильное содержания никеля в концентрате значительно уменьшают возмущающее воздействие по его составу при управлении процессом переработки концентрата в печи взвешенной плавки. Реакция системы управления на возмущение, а также работа всех ее функций были проверены в среде MatLab (Simulink). Графическое сравнение результатов работы разработанной системы и архивных данных показывает значительное улучшение процесса сгущения при использовании системы. Определение управляющих параметров и тестирование оптимизации процесса сгущения были проведены в программном продукте Proficy Troubleshooter;

2. На основе алгоритма параллельного управления переделом сгущения медно-никелевых концентратов разработан программный продукт, представляющий собой исполнительный файл для ЭВМ под управлением MS Windows. В данном продукте помимо алгоритма управления реализована обработка аварийных и штатных ситуаций процесса, реализована взаимосвязь со сторонним программным обеспечением, например связь со SCADA системами или ПЛК возможна по протоколу OPC, связь с ПЛК от фирм GE и Siemens возможна по специальному драйверу связи. Использование продукта

предполагается в виде экспертной системы для существующей автоматизированной системы управления. С помощью продукта выполняется периодическое регулирование процесса в определенном диапазоне значений контрольной величины, при этом аварийные блокировки и основная обработка данных процесса происходит в существующей SCADA системе. Основные преимущества разработанного продукта состоят в его мобильности (возможен перенос .exe файла на любую ЭВМ в сети), универсальности (поддерживается масштабируемое количество сгустителей, задаваемые границы основных переменных процесса), низкой стоимости (модернизация процесса не требует значительных затрат на новое оборудование КИПиА и лицензированное программное обеспечение, за исключением системных программ);

3. Статистическая модель процесса сгущения медно-никелевых концентратов имеет высокую сходимость (до 95%) с архивными данными. Разработка статистической модели велась двумя способами, первый – Proficy CSense, второй – RTD, MatLab (Simulink). Обе модели имеют высокий процент сходимости (до 95%), но использование программного пакета от компании GE позволяет значительно сократить трудозатраты инженера и избежать возможных ошибок при стандартном статистическом моделировании. Также Proficy CSense в виде продуктов Proficy Troubleshooter и Proficy Architect позволяет проводить исследование процесса на созданной статистической модели, что дает возможность получения неопределенных ранее взаимосвязей процесса. Также в данной работе было предложено учитывать структуру гидродинамической модели сгустителя, что позволило значительно увеличить точность определения взаимосвязи между переменными процесса сгущения. Для этого использовался программный продукт RTD, разработанный в Санкт-Петербурге, данный продукт позволяет создавать модели процессов с определением структуры потока в используемых аппаратах. Созданные в ходе диссертационной работы высокоточные статистические модели позволили провести тщательный анализ

сложного процесса, а также синтезировать автоматизированную систему управления;

4. Разработанный на основе статистической модели универсальный программный тренажер передела сгущения позволяет ускорить внедрение автоматизированной системы параллельного управления загрузкой и разгрузкой сгустителей за счет предварительного обучения персонала. Тренажер представляет собой проект SCADA системы, который посредством OPC технологии связывается со статистической моделью, разработанной в среде MatLab (Simulink). В программу выполнения тренажера заложен алгоритм, согласно которому испытуемый оператор получает определенные задания от системы, выполнение этих заданий позволяет подготовить персонал к работе с новой системой управления и значительно улучшить результаты работы этой системы. На данный тренажер получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015614355;

5. Использование регулятора, основанного на базе нечетких правил и статистической модели объекта позволяет прогнозировать расход дутья в печь взвешенной плавки никелевых концентратов при стабильном поддержании параметра температуры реактора и состава штейна. На основе данного регулятора синтезирована автоматизированная системы управления процессом плавки. Совместное использование этой системы и системы параллельного управления переделом сгущения позволяет значительно улучшить качество штейна за счет уменьшения возмущающих воздействий по составу шихты;

6. С помощью программного пакета Proficy Troubleshooter был установлен характер зависимости расхода дутья и состава получаемого штейна. Зависимость имеет гиперболический вид;

7. Автоматизированная система управления, основанная на регулировании с прогнозирующей моделью, позволяет стабилизировать температуру газов под сводом печи кипящего слоя посредством изменения расхода концентрата в печь. Система управления была полностью синтезирована на основе статистической

модели, созданной в Proficy CSense, управление процессом ведется с помощью данного продукта, а именно, предлагаемого к использованию отдельного сервера прогнозирующего управления, который по сети Ethernet связывается со SCADA системой и производит управление регулируемыми параметрами. Использование регулятора с прогнозирующей моделью позволяет вывести процесс обжига никелевых концентратов на новый качественный уровень. Так как регулирование в соответствии с взаимосвязями объекта предвосхищает изменение целевого параметра, происходит значительное уменьшение перерегулирования, а значит и повышение качества огарка. Также постоянное значение температур газов под сводом печи позволяет проводить полный обжиг тонких фракций никелевого концентрата и выдерживать температурный режим пылеулавливающего оборудования;

8. Взаимосвязь расхода концентрата в печь кипящего слоя и температуры потока огарка в трубчатую вращающуюся печь имеет нелинейную зависимость, а именно, с 0 до 12 т/ч зависимость $y = \sqrt{kx}$, где $k > 0$, с 12 до 30 т/ч зависимость $y = ex$. Корреляционная зависимость между данными параметрами составляет 83,94%. Исследования взаимосвязи расхода концентрата и температуры потока огарка позволяют предположить возможное ее использование для расчета расхода огарка в трубчатую вращающуюся печь, ведь чем больше огарка пройдет в печь, тем больше тепловой энергии будет передано этому потоку. Производственная необходимость состоит в том, что использование существующих расходомеров при такой температуре (1100 °С) невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменко И.Г. Теория автоматического управления // Харьков: ХНАГХ, 2008. – 190 с.
2. Акинфиев Н.Н. Исследование в учебном практикуме по химии (термодинамика). Учебно-практическое пособие / Н.Н. Акинфиев, С.С. Епифанова // М.: РГГРУ, 2008. – 29 с.
3. Акчурин Э.А. Имитационное моделирование канала связи с использованием нечеткой логики // П.:РИО ПГСХА. – 2009. – С.3-5.
4. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы // М.: Высшая школа. 1989. – 263 с.
5. Александров В.В. Автоматизированная система управления «Нефилин-1» // М.: Metallургия, 1976. – 10 с.
6. Алексеев Ю. В. Обжиг никелевых концентратов в кипящем слое / Ю.В. Алексеев, А.Ф. Астафьев// Издательство «Металлургия», 1967. – 104 с.
7. Астафьев А.Ф. Окислительный обжиг никелевых сульфидных полупродуктов в кипящем слое / А.Ф. Астафьев, Ю.В. Алексеев // М.: Metallургия, 1982. – 176 с.
8. Бабко Л.В. Теория автоматического управления в примерах и задачах с применением Matlab / Л.В. Бабко, В.П. Васильев, В.С. Королев, Н.Д. Тихонов // СПб.:СПбГТУ, 2001. – 99 с.
9. Батунер Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин // Л.:Химия, 1971. – 824 с.
10. Беллеман Р. Процессы регулирования с адаптацией // М.:Наука, 1964. – 359 с.
11. Белоглазов И.И. Изучение распределения времени пребывания продуктов обжига в печах кипящего слоя / Ю.В. Шариков, И.Н. Белоглазов, И.И. Белоглазов // Записки Горного института, том 169. – 2006. – С.61-62.
12. Белых В.Л. Исследование процессов в шихтово-кислородном факеле при автогенной плавке сульфидного сырья // М.: Гинцветмет, 1983. – С. 67-74.

13. Блишун А.Ф. Нетрадиционные модели и системы с нечеткими знаниями // М.:Энергоатомиздат, 1991. – 212 с.
14. Бобиков А.И. Использование пакета SIMULINK/MATLAB для построения S-функций систем управления / А.И. Бобиков, А.В. Рязанов // Рязань:РГРТА, 2005 – 54 с.
15. Богатырев А.А. Стандартизация статистических методов управления качеством / А.А, Богатырев, Ю.Д. Филиппов // М.: ГИЗФМЛ, 1962. – 562 с.
16. Болотаева И.И. Математическая модель сгущения пульп в сгустителях непрерывного действия // Материалы XLIII международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск. – 2005. – С.169-172.
17. Болотаева И.И. Математическая модель сгущения пульп в сгустителях непрерывного действия // Материалы XLIII международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск. – 2005. – С.169-172.
18. Болотаева И.И. Моделирование процесса сгущения / И.И. Болотаева, А.Л. Рутковский // Труды молодых ученых. Владикавказ. – 2005. – №1. – С.52-57.
19. Болотаева И.И. Новый метод контроля качества отстоя в сгустителях / И.И, Болотаева, А.Л. Рутковский // Пятая межрегиональная научная конференция «Студенческая наука - экономике России». – 2005. – С.114-116.
20. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация / К. Браммер, Г. Зиффлинг // М.:Наука, 1982. – 199 с.
21. Буровой Н.А. Автоматическое управление процессами в кипящем слое. - М.: Металлургия, 1969. – 472 с.
22. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем // М.: Наука, 1978. – 400 с.
23. Васильев Р.Р. Надежность и диагностика автоматизированных систем / Р.Р. Васильев, М.З. Салихов // М.: ГТУ МИСиС, 2005, – 91 с.

24. Веников В.А. Теория подобия и моделирования / В.А. Веников, Г.В. Веников // М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
25. Верятин У.Д. Термодинамические свойства неорганических веществ. Справочник / У.Д. Верятин, В.П. Маширев, Н.Г. Рябцев, В.И. Тарасов, Б.Д. Рогозкин, И.В. Коробов // М: Атомиздат, 1965. – 459 с.
26. Вольдман Г.М. Теория гидрометаллургических процессов / Г.М. Вольдман, А.Н. Зеликман // М.:Интермет Инжиниринг, 2003. – 462 с.
27. Вольский С.Г. Теория линейных систем автоматического регулирования // ВМФ, 1991. – 274 с.
28. Воротников В.И. Основы теории частичной устойчивости и управления / В.И. Воротников, В.В. Румянцев // Нижний Тагил:НТИ УрФУ, 2014. – 304 с.
29. Гальнбек А.А. Непрерывное конвертирование штейнов // М.: Metallurgia, 1993. – 85 с.
30. Гельднер К. Нелинейные системы управления (перевод с немецкого) // М.:Мир, 1983. – 368 с.
31. Гильперин И.И. Основы техники псевдооживления / И.И. Гильперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша // М.: Химия, 1967. – 664 с.
32. Гиссин В.И. Управление качеством продукции: Учебное пособие // Ростов: Феникс, 2000. – 256 с.
33. Григорьев В.В. Проектирование регуляторов для стохастических систем и объектов с неопределенными параметрами / В.В. Григорьев, С.В. Быстров, В.И. Бойков // СПб.:НИУ ИТМО, 2013. – 172 с.
34. Громов Ю.Ю. Оптимальное управления динамическими системами / Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, А.В. Лагутин, О.Г. Иванова, В.М. Тютюнник // Тамбов: Тамбовский государственный технологический университет, 2007. – 108 с.
35. Гузаиров Р.С. Эффективные пути комплексного использования сырья // Цветные металлы. – 1977. – №11. – С.64-68.
36. Гуськов В.И. О закономерностях фильтрования со смывом осадка потоком

- фильтруемой суспензии / В.И. Гуськов, Н.Д. Ивановский // Цветные металлы. – 1973. – №8. – С.8-11.
37. Дал У. И. Универсальный язык моделирования / У.И. Дал, Б. Мюрхауг, К. Нюгорд // М.: Мир, 1969. – 99 с.
38. Данилов М.П. Промышленные испытания по отработке режимов работы нового распылителя шихты // Цветные металлы. – 2004. - №11. – С. 28-30.
39. Данилова А.Г. Интенсификация процесса разделения твердых и жидких фаз пульп цинкового производства/ А.Г. Данилова, Р.Д. Алабергенов, Х.Р. Исматов // Институт химии АН УзССР, 1987. – 7 с.
40. Дебни. Дж. SIMULINK 4 секреты мастерства (Перевод с англ. Симонова Л.М.) / Дж. Дебни, Т. Харман. // М.:БИНОМ, 2003. – 404 с.
41. Дембовский В.В. Автоматизация управления производством // СПб:СЗТУ, 2004. – 82 с.
42. Денбиг К.Г. Теория химических реакторов // М.: Наука, 1968. – 191 с.
43. Дьяконов В. MATLAB обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. / В. Дьяконов, И. Аброменко // СПб., 2002. – 606 с.
44. Ермаков С.М. Математический эксперимент с моделями сложных стохастических систем / С.М. Ермаков, В.Б. Мелас // СПб.: Изд. ГУ, 1993. – 270 с.
45. Ефимов В.В. Статистические методы в управлении качеством: учебное пособие // Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 134 с.
46. Звенцев И.В. Нейронные сети: основные модели // Воронеж, 1999. – 76 с.
47. Ивахненко А.Г. Предсказание случайных процессов / А.Г. Ивахненко, В.Г. Лапа // Киев: «Наукова думка», 1971. – 415 с.
48. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным // М.:Радио и связь, 1987. – 120 с.
49. Каганович Ю. Я. Промышленное обезвоживание в кипящем слое // Л.: Химия, 1990. – 144 с.

50. Калашников В.В. Математические методы построения стохастических моделей обслуживания / В.В. Калашников, С.Т. Рачев // М.: Наука, 1988. – 312 с.
51. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии // М.: Химия, 1971. – 784 с.
52. Кафаров В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических схем / В.В. Кафаров, В.Л. Перов, В.П. Мешалкин // М.: Химия, 1974. – 344 с.
53. Кафаров В. С. Методы кибернетики в химии и химической технологии // М.: Химия, 1968. – 496 с.
54. Клушин Д.Н. Кипящий слой в металлургии / Д.Н. Клушин, Э.Я. Серебренникова, А.Д. Бессер // М.: Металлургия, 1978. – 280 с.
55. Кобахидзе В.В. Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии // М.: МИСиС, 1994. – 356 с.
56. Кочинев Ю.Ю. Техника планирования эксперимента: Учебное пособие / Ю.Ю. Кочинев, В.А. Серебряников // Л.: ЛПИ, 1986. – 70 с.
57. Крупнов Л.В. Механизм образования тугоплавкой настыли в печах взвешенной плавки и способы ее устранения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.02. – СПб. 2015. – 222 с.
58. Крылов В.М. Теория и практика математического моделирования. Учебное пособие / В.М. Крылов, В.А. Холоднов // СПб.:СПбГТИ(ТУ), 2006. – 171с.
59. Кулаков Г. Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования // Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.
60. Купряков Ю.П. Распределение магнетита между шлаком и штейном. Настылеобразование // М.: Автогенная плавка медных концентратов во взвешенном состоянии, 1979. – С. 5-13.
61. Купряков Ю.П. Шихтовые материалы и подготовка их к плавке // М.: Металлургия, 1979. – С.8-27.
62. Кучин Г.М. Обжиг цинковых концентратов в кипящем слое // М.:

- Металлургия, 1966. – 75 с.
63. Лapidус В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях // М.: ОАО «Типография «Новости», 2000. – 432 с.
64. Марка Дэвид А. Методология структурного анализа и проектирования / Дэвид А. Марка, Клемент Мак-Гоуэн // М., 1993. – 240 с.
65. Матасов А.В. Блочный подход к моделированию процессов распылительной сушки. Тезисы докладов IX Международной конференции молодых ученых по химии и химической технологии <МКХТ-95> / А.В. Матасов, Н.В. Меньшутина // М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – 1995. – С.17.
66. Набойченко С.С. Процессы и аппараты цветной металлургии: Учебник для вузов / С.С. Набойченко, Н.Г. Агеев, А.П. Дорошкевич, В.П. Жуков, Е.И. Елисеев, С.В. Карелов, А.Б. Лебедь // Екатеринбург: УГТУ, 1997. - 648 с.
67. Николаев А.Н. Влияние стабилизации выходной плотности сгущения на выходной продукт. / А.Н. Николаев, Ю.В. Шариков, А.А. Кравчук // Научно – технический журнал «Металлург». – 2016. – №2. – С.85-87.
68. Николаев А.Н. Применение комплекса Proficy Troubleshooter для установления зависимости между входными и выходными переменными обжига никелевого концентрата / А.Н. Николаев, Ю.В. Шариков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №12(54). – С.21-23.
69. Новые процессы в металлургии никеля, меди и кобальта. Теория и практика / Труды АО «Институт Гипроникель» // М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2000. – 296 с.
70. Ойгенблик В.К. Применение метода «теплового импульса» при исследовании перемешивания твердых частиц в аппаратах с кипящим слоем / А.А. Ойгенблик, В.К. Вакар, А.С. Железнов // М.: Научно-технический реферативный сборник НИИ технико-экономических исследований. Хлорная промышленность. – 1982. – №2. – С.21-24.

71. Персиц В.З. Измерение и контроль технологических параметров на обогатительных фабриках // М.: Недра. – 1982. – С. 142-143.
72. Петросянц С.А. Изучение процесса сгущения кислых цинковых пульп путем непрерывной фиксации изменения плотности // Труды СКГМИ (ГТУ). – 1974. – №37. – С.59-61.
73. Прокофьев Е.В. Автоматизация обогатительных фабрик: Учебное пособие // Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2006. – 121 с.
74. Растяпин В.А. Автоматизация процессов сгущения на обогатительных фабриках / В.А. Растяпин, Л.В. Шпиловой // М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1980. – 20 с.
75. Резник И.Д. Никель: в 3-х томах. Т. 3. Сульфидные медно-никелевые руды. Характеристика руд и месторождений. Пирометаллургия и гидрометаллургия сульфидного медно-никелевого сырья / И.Д. Резник, Г.П. Ермаков, Я.М. Шнеерсон // – М.: Наука и технологии, 2003. – 608 с.
76. Робертсон А. Управление качеством // М.: Прогресс, 1974. – 254 с.
77. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина // Л.: Химия, 1974. – 288 с.
78. Романков П.Г. Процессы и аппараты химической промышленности / П.Г. Романков, М.И. Курочкина, Ю.Я. Моржерин, Н.Н. Смирнов // Л.: Химия, 1989. – 560 с.
79. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская // Л.: Химия, 1979. – 272 с.
80. Рутковский А.Л. Совершенствование системы автоматического управления процессом сгущения / А.Л. Рутковский, А.А. Саакянц, И.И. Болотаева // Труды СКГМИ (ГТУ). – 2006. – С. 88-91.
81. Рутковский А.Л. Контроль качества отстоя осветленного слоя в сгустителях спектральным методом / А.Л. Рутковский, А.А. Саакянц, В.М. Текиев, И.И. Болотаева // Известия ВУЗ. Цветная металлургия. – 2005. – №1. – С.73-76.
82. Рутковский А.Л. Контроль качества процесса сгущения с целью

- уменьшения вредных сбросов / А.Л. Рутковский, И.И. Болотаева // Пятая Северо-Кавказская региональная конференция «Студенческая наука - экологии России». – 2005. – С.48-52.
83. Рутковский А.Л. Применение спектрального метода для контроля качества отстоя осветленного слоя в сгустителях / А.Л. Рутковский, И.И. Болотаева // Труды СКГМИ (ГТУ). – 2005. – С.64-68.
84. Сажин Б. С. Основы техники сушки // М.: Химия, 1984. – 320 с.
85. Салихов З.Г. Совершенствование гидрометаллургических процессов и оборудование в металлургии тяжелых цветных металлов: Тез. докл. На Всесоюзном Научно-техническом семинаре / З.Г. Салихов, В.М. Огородничук, И.А. Буровой // М.: ВДНХ СССР. – 1977. – С.5-7.
86. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614355. Универсальный программно – технический тренажер для управления процессом сгущения / А.Н. Николаев, Ю.В. Шариков // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 апреля 2015 г.
87. Сергеев С.К. Менеджмент качества и сертификации: Учебное пособие / С.К. Сергеев, А.А. Такташов // М.: ИПК, 1997. – 368 с.
88. Серебренникова Э.Я. Обжиг сульфидных материалов в кипящем слое // М.: Металлургия, 1982. – 111 с.
89. Синев Л.А. Плавка сульфидных концентратов во взвешенном состоянии / Л.А. Синев, В.Ф. Борбат, А.И. Козюра // М.: Металлургия, 1979. – 150 с.
90. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев // М.: Высшая школа, 1985. – 272 с.
91. Строителей В.Н. Статистические методы – основной инструмент специалиста в области качества // Качество, инновации, образование. – 2002. – №1. – С. 11-17.
92. Тихонов О.Н. Об одной критерии оптимальности в процессах обогащения // Доклад на международной конференции ICAMC, ЧССР, Острава. – 1967.

– №1.

93. Тихонов О.Н. Введение в динамику процессов обогатительной технологии // Л.: Недра, 1973. – 240 с.
94. Тихонов О.Н. Гравитационное разделение многокомпонентных систем // Обогащение руд. – 1968. – №1.
95. Тихонов О.Н. О динамике процессов обогатительной технологии // «ИВУЗ - цветная металлургия». – 1968. – №3
96. Транксел Д. Синтез систем автоматического регулирования // М.: Машгиз, 1959. – 614 с.
97. Успенский М.С. Тонкослойный разделитель гидрометаллургических суспензий / М.С. Успенский, И.И. Москоленко, К.Ф. Законова, С.Ф. Чулков // Цветная металлургия. – 1990. – №2. – С.11-12.
98. Фельдбаум А.А. Электрические системы автоматического регулирования // М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1957. – 809 с.
99. Фомин В.Н. Квалиметрия. Управление качеством. Сертификация: Курс лекций // М.: Ассоциация авторов и издателей «ТАНДЕМ». Изд-во «ЭКМОС», 2000. – 320 с.
100. Харман Г. Современный факторный анализ // М.: Статистика, 1972. – 312 с.
101. Холоднов В.А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов / В.А. Холоднов, В.П. Дьяконов, Е.М. Иванова, Л.С. Кирьянова // СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2003. – 480 с.
102. Холоднов В.А. Системный анализ и принятие решений. Компьютерные технологии моделирования химико - технологических систем / В.А. Холоднов, К. Хартманн, В.Н. Чепикова, В.П. Андреева // СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2007. – 160 с.
103. Холоднов В.А., Лебедева М.Ю., Пунин А.Е., Хартманн К. Системный анализ и принятие решений. Компьютерные технологии решения задач

- многоцелевой оптимизации систем. Учебное пособие / В.А. Холоднов, М.Ю. Лебедева, А.Е. Пунин, К. Хартманн // СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2006. – 153 с.
104. Черных И.В. SIMULINK - среда создания инженерных приложений // М.: «Диалог-МИФИ», 2004. – 491с.
105. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – Искусство и наука // М.: Мир, 1978. – 418 с.
106. Штербачек З. Перемешивание в химической промышленности: (пер. с чешск./Под ред. Павлушенко И.С.) / З. Штербачек, П. Тауск // Л.: Химия, 1963. – 416 с.
107. Booch G. Object-oriented analysis and design with applications: Second edition // The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc, 1994. – 589 p.
108. Kiranoudis C. T. An Integrated Computer-Based Dryer Simulator / C.T. Kiranoudis, L.B. Maroulis, D. Marinous-Kouris // Computers and Chemical Engineering. – 1994. – P.265-269.
109. Nikolaev A.N. The problem of stabilization of the thickening process and possible method to solve it / A.N. Nikolaev, Y.V. Sharikov // International research journal. – 2015. – №9(40). – P.82-84.
110. Rutkovskii A.L. Monitoring the clarified-layer sediment quality in coagulators by a spectral method / A.L. Rutkovskii, A.A. Saakyants, V.M. Tekiev, I.I. Bolotaeva // Russian Journal of Non-Ferrous Metals, Allerton Press. Inc. Vol. 46. – 2005. – No. 2. – P.38-41.
111. Vonecec V. Economics of Fluidized Bed Drying / V. Vonecec, M. Markvart, R. Drbohlav // Brit. Chem. Eng. – 1962. – v.7. – №6. – P.428-431.
112. Cheminform St.Petersburg Ltd.: [Электронный ресурс]. СПб., 2011. URL: <http://www.cisp.spb.ru/rtd>. (дата обращения 15.08.2016).
113. Промышленная автоматизация ИНДАСОФТ.: [Электронный ресурс]. М., 1996 – 2017. URL: <http://www.indusoft.ru/media/articles/442/>.

114. TADVISER.: [Электронный ресурс]. М., 2005 – 2017. URL:
http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:GE_Proficy_CSense.
115. Файловый архив студентов StudFiles [Электронный ресурс].
<http://www.studfiles.ru/preview/2653055/page:9/>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

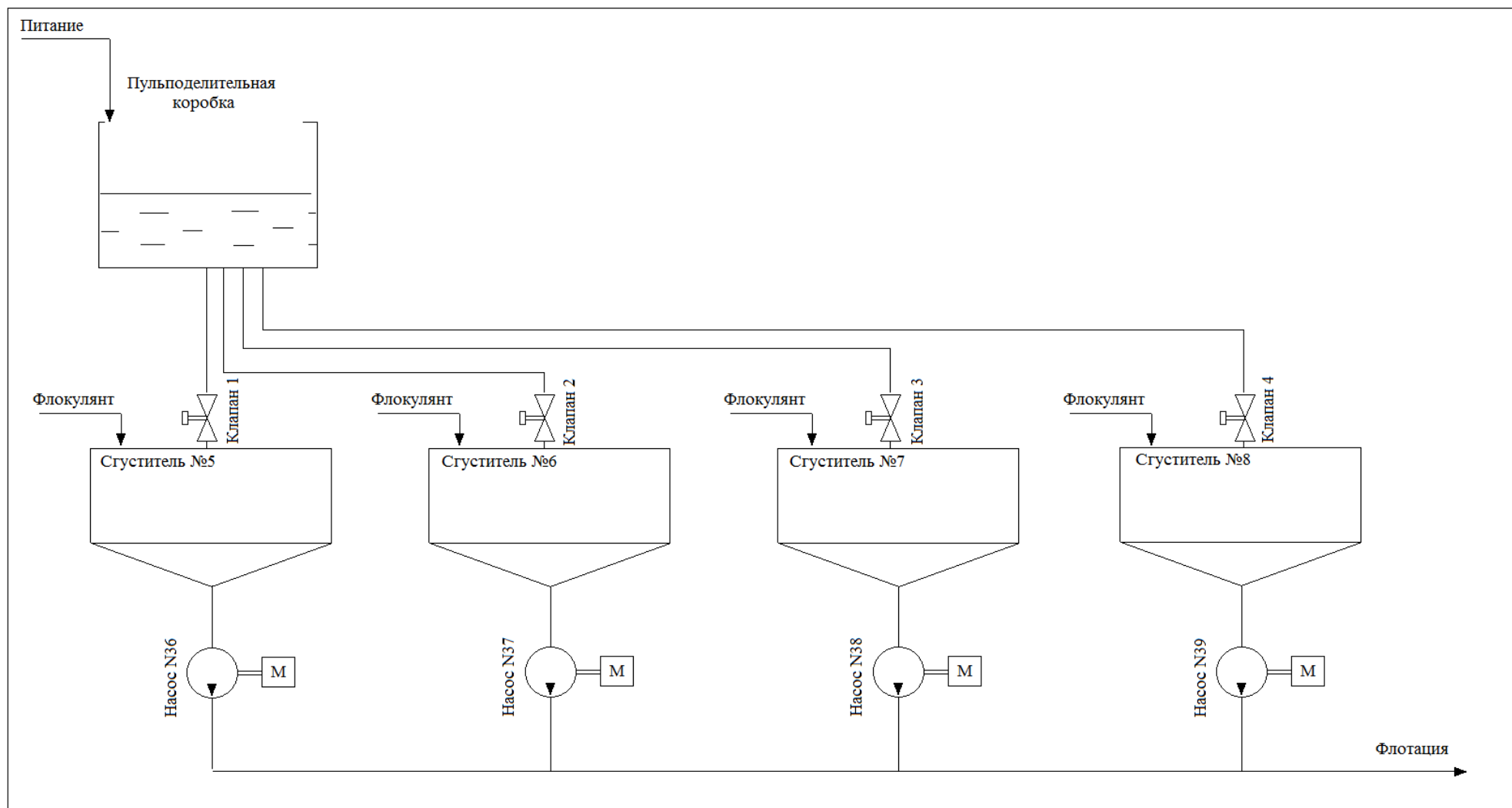


Рисунок 95 – Структурная схема передела сгущения медно-никелевых концентратов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

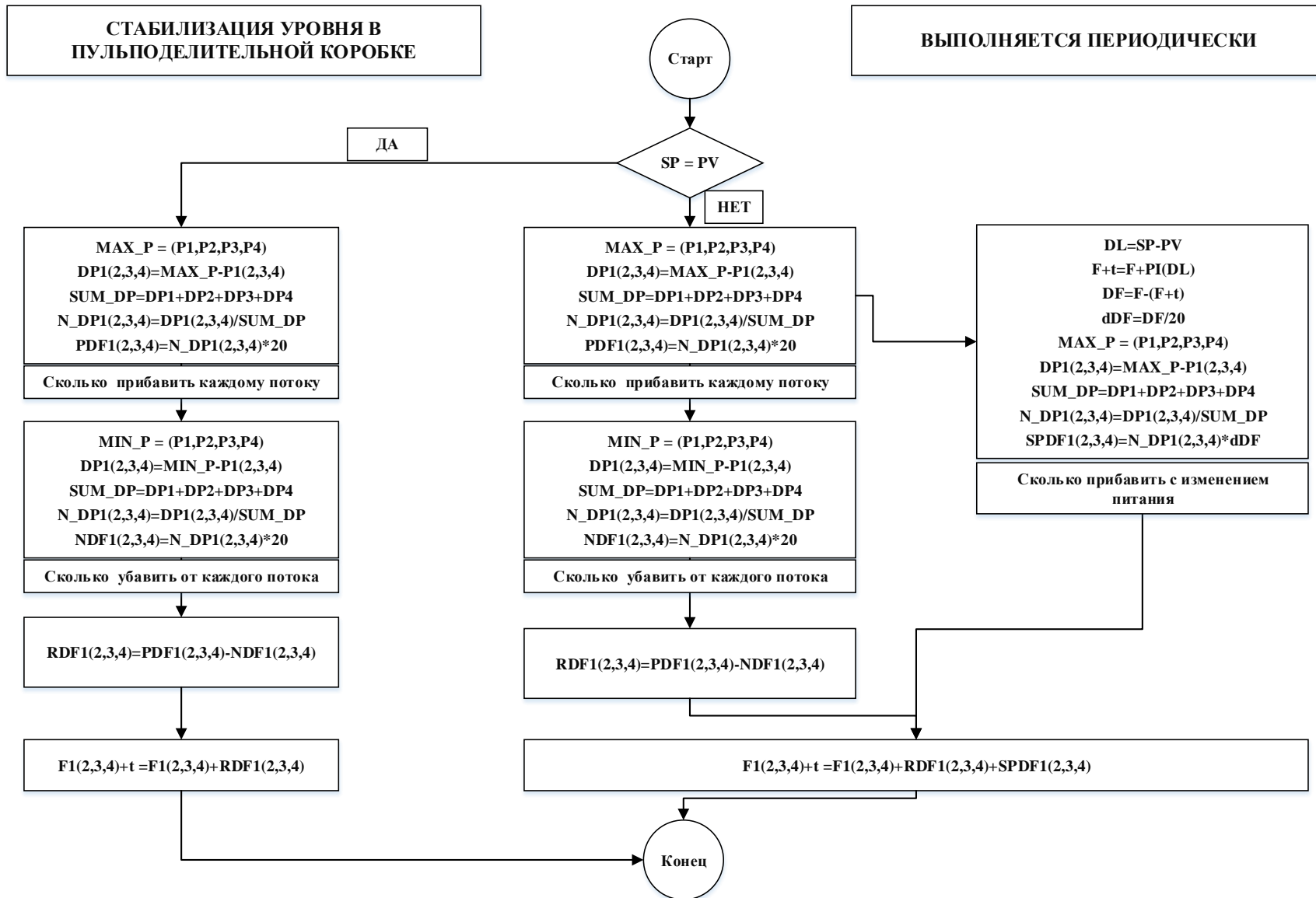


Рисунок 96 – Блок схема алгоритма распределение загрузки и стабилизации уровня в пульподелительной коробке

ПРИЛОЖЕНИЕ В

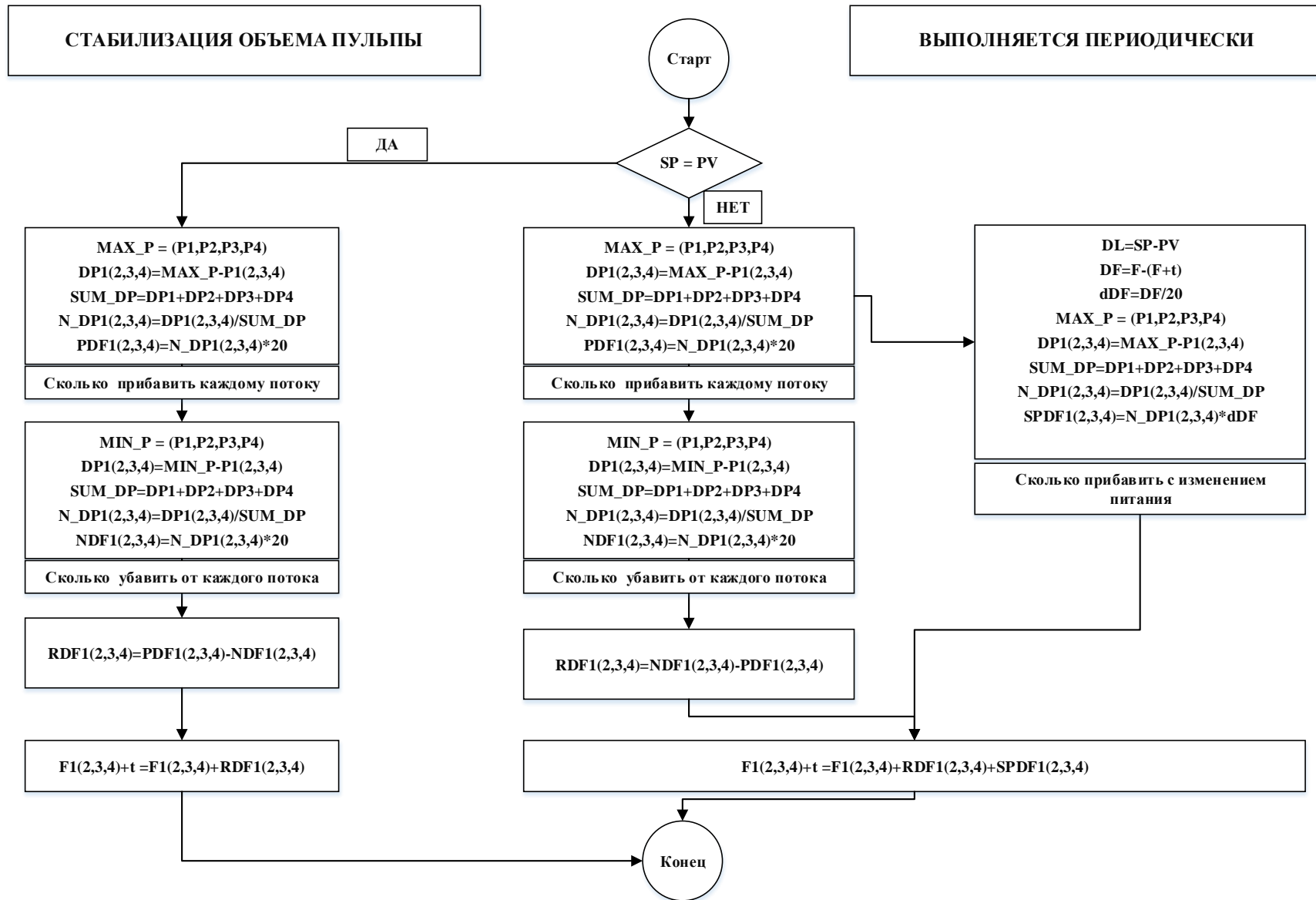


Рисунок 97 – Блок схема алгоритма распределение разгрузки и стабилизации объема пульпы

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

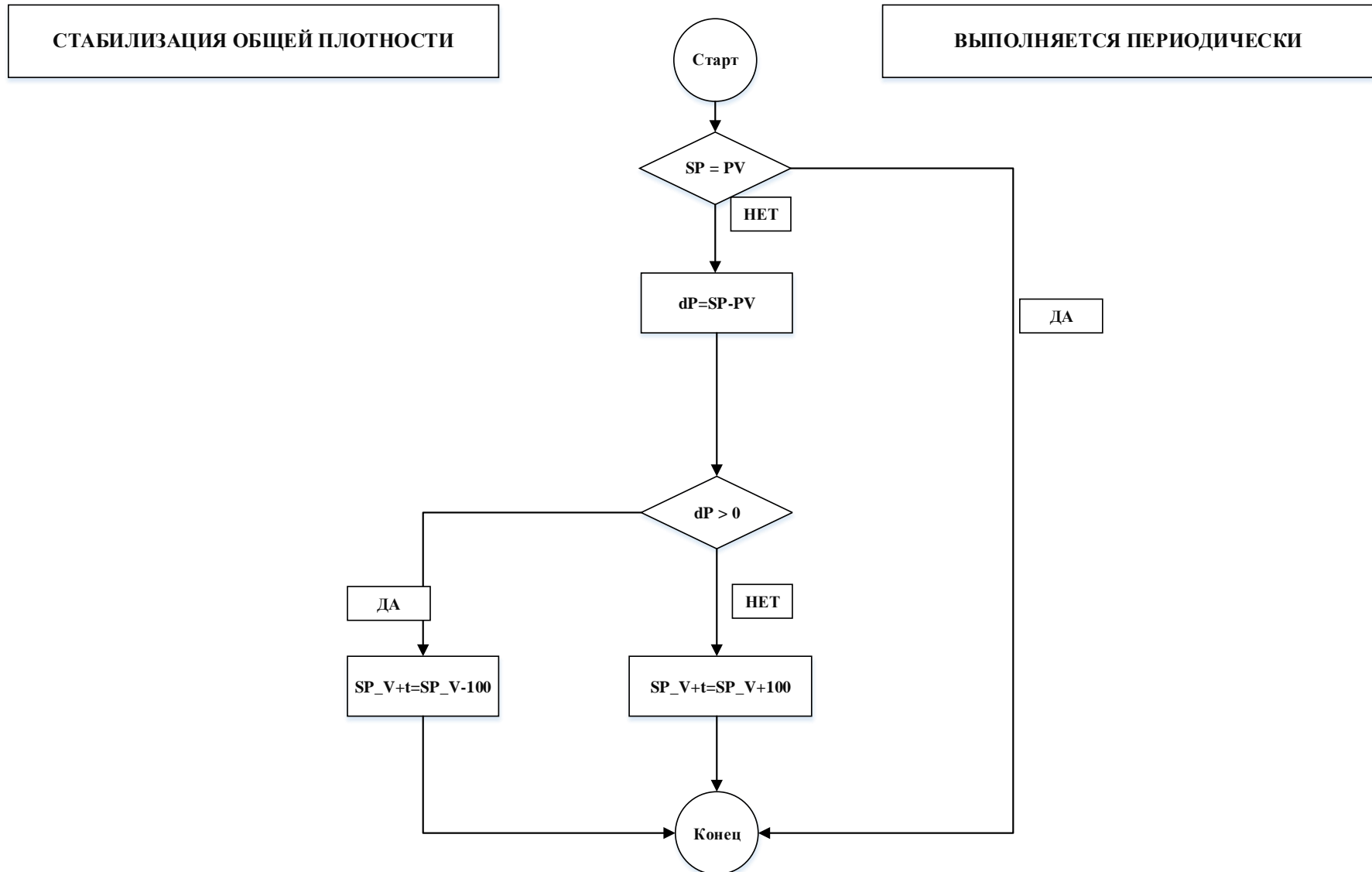


Рисунок 98 – Блок схема алгоритма распределение разгрузки и стабилизации общей плотности

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

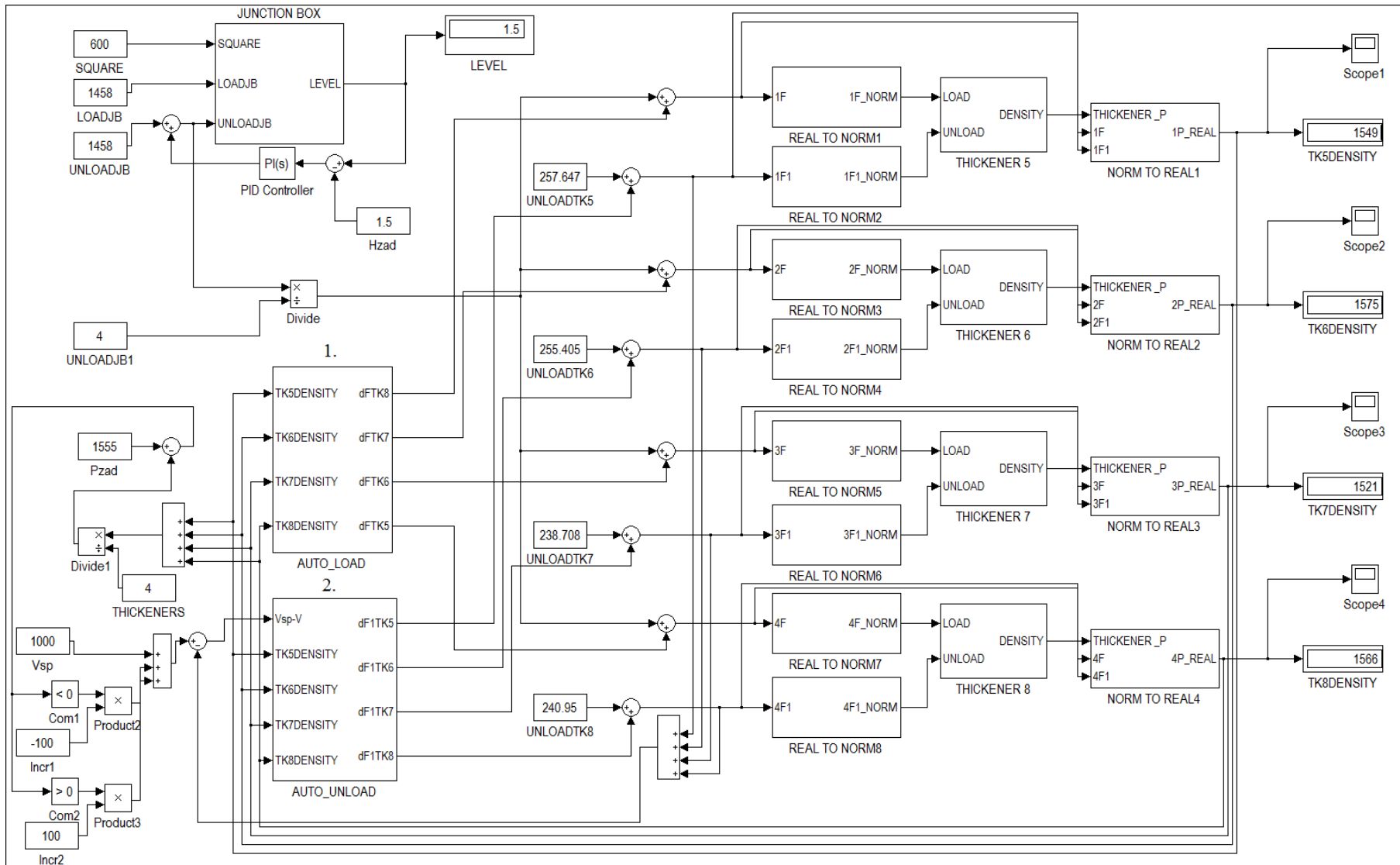


Рисунок 99 – Система автоматизированного параллельного управления загрузкой и разгрузкой сгустителей
 где 1 – блок распределения загрузки сгустителей, 2 – блок распределения разгрузки сгустителей