

На правах рукописи

ФЕДОРОВА Эльмира Рафаэлевна



**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПИТАЮЩЕГО ПОТОКА МЕЖДУ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СГУСТИТЕЛЯМИ ПРИ
УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПЕРЕДЕЛОМ
СГУЩЕНИЯ И ПРОМЫВКИ КРАСНЫХ ШЛАМОВ
ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

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

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

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

Научный руководитель
кандидат технических наук

Фирсов Александр Юрьевич

Официальные оппоненты:

Русинов Леон Абрамович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, заведующий кафедрой

Голубев Владимир Олегович

кандидат технических наук, ООО «РУСАЛ ИТЦ», начальник отдела математического моделирования и автоматизации глиноземного производства

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Защита диссертации состоится 29 июня 2017 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.03 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 апреля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БРИЧКИН
Вячеслав Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Передел сгущения и промывки красных шламов (КШ) является одним из важнейших переделов глиноземного производства. Неконтролируемые возмущения и большая инерция в получении информации об условиях протекания процесса существенно усложняют задачу управления.

Основным технологическим параметром, определяющим работу сгустителя КШ, является мутность верхнего слива сгустителя. Функции существующих систем управления (СУ) сгущением шлама заключаются в стабилизации параметров первичных технологических контуров. Но процесс сгущения КШ характеризуется большим количеством выходных показателей, многие из которых сильно коррелированы между собой и управление по одноконтурным алгоритмам и вручную малоэффективно.

Актуальным направлением научных исследований является создание и совершенствование моделей и СУ процессом сгущения. Данному вопросу посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов, таких как А.И. Лайнер, А.Л. Рутковский, В.А. Растяпин, F. Concha, J. Farrow, P. Scales, S. Usher. Работы таких выдающихся ученых как A. Ardila Labiosa, R. Burger, K.H. Karlsen, N.H. Risebro, J.D. Towers, S. Diehl, M.C. Bustos, K. Lie, H.S. Coe, G.H. Clewenger, R.H. Davis, K.H. Birdsell посвящены процессу непрерывного осаждения и методам его моделирования. Существующие модели не в полной мере учитывают наличие возмущающих воздействий, в частности распределение частиц по размерам в питании, размер флокулируемых частиц, форму образующейся флокулы, зарастание и зашламливание сгустителя. Информация об использовании СУ на основе регулятора с прогнозирующей моделью для процессов сгущения КШ в современной научно-технической литературе практически отсутствует.

Незавершенной и актуальной задачей в настоящее время является распределение потока КШ между параллельно работающими сгустителями. Данный вопрос недостаточно проработан, имеются запатентованные методики управления, но они полуавтоматические. Существенный вклад в развитие данного вопроса внесли отечест-

венные ученые и инженеры, такие как М.В. Левин, Т.Б. Потапова, В.В. Александров, Т.Г. Мильбергер, П.Ф. Минин, И.М. Файн, Р.М. Хамидов, а также следующие организации: Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности, Пикалевский глиноземный комбинат, Павлодарский алюминиевый завод. Для оптимизации процесса сгущения следует применять методы и алгоритмы, которые характеризуются памятью и способностью к распознаванию. Система автоматического управления (САУ) на базе алгоритма клонального отбора позволит решить задачу распределения потока КШ между параллельно работающими сгустителями.

Цель работы. Повышение эффективности сгущения КШ за счет управления параллельно работающими сгустителями с помощью САУ на базе регулятора с прогнозирующей моделью и блока оптимизации на основе алгоритма клонального отбора.

Задачи исследования:

- Анализ зависимости технологических параметров и технического состояния сгустителей передела сгущения и промывки КШ, содержания твердой фракции в сгущенном продукте, выходной концентрации осветленного слоя от возмущающих воздействий с использованием интеллектуального анализа данных;
- Проведение экспериментальных исследований для идентификации параметров модели;
- Разработка CFD модели сгустителя;
- Разработка обобщенной модели сгустителя;
- Синтез САУ параллельно работающими сгустителями.

Научная новизна работы:

- Разработана обобщенная математическая модель сгустителя, которая состоит из моделей зоны флокуляции твердой фракции питающей суспензии, зоны стесненного осаждения и эффективного сжатия осадка, зоны осветления. Модель сгустителя цилиндрической формы учитывает зарастание и зашламливание агрегата в процессе его эксплуатации и позволяет прогнозировать содержание твердой фракции в сгущенном продукте в диапазоне 0.01-0.10 об.долей, в верхнем сливе в диапазоне 0-1000 мг/л;

- Учет при моделировании процесса сгущения конической части сгустителя для исследуемого объекта управления (ОУ) позволяет на 30 % уменьшить погрешность при расчете высоты постели;
- Разработана CFD модель сгустителя, которая учитывает распределение частиц по размерам в питающей пульпе сгустителя и действие перемешивающих граблин;
- Синтезирована САУ параллельно работающими сгустителями на базе регулятора с прогнозирующей моделью и блока оптимизации на основе алгоритма параллельного поиска оптимума функции, имеющей не единственное решение.

Практическая значимость работы:

1. Разработана программа для ЭВМ «Программный тренажер для моделирования процесса сгущения» для решения задачи одномерного моделирования процесса осаждения твердой фракции, флокулированной суспензии в сгустителе цилиндрической формы, с целью вычисления профиля концентрации в сгустителе;
2. Обобщенная математическая модель учитывает зарастание сгустителя в процессе его эксплуатации и может быть использована в алгоритмах управления по модели для каждого отдельного аппарата;
3. CFD модель сгустителя может быть использована для оценки распределения твердой фракции в объеме аппарата и в верхнем осветленном сливе, влияния диапазона распределения твердой фракции в питании сгустителя или диапазона флокул, образовавшихся в процессе флокуляции в питающем стакане, на мутность верхнего слива сгустителя;
4. Синтезированная САУ на базе управляющего устройства с прогнозирующей моделью и блоком оптимизации на основе алгоритма клонального отбора представляет собой универсальное решение задачи распределения питающего потока КШ между параллельно работающими сгустителями и позволяет стабилизировать содержание твердой фракции в нижнем продукте в диапазоне 0.085-0.095 об.долей, минимизировать суммарный массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом, в среднем на 180 кг/ч;

5. Научные результаты работы могут являться дополнением к учебному процессу факультета переработки минерального сырья Горного университета для студентов направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Личный вклад автора состоит в анализе процесса сгущения КШ, существующего оборудования для обезвоживания металлургических пульп, СУ процессом сгущения, идентификации параметров модели, создании обобщенной модели сгустителя, САУ параллельно работающими сгустителями, апробации достигнутых результатов, подготовке публикаций.

Методика исследований. В работе использовался комплексный подход, включающий теоретический метод анализа и синтеза, экспериментальные исследования и моделирование процесса сгущения. Моделирование процесса сгущения КШ проводилось с помощью программных пакетов MatLab и ANSYS Fluent. Синтез САУ параллельно работающими сгустителями на базе алгоритма параллельного поиска оптимума функции производился в среде MatLab и GE Proficy Csense. САУ протестирована на основе производственных архивных данных.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации обусловлены значительным количеством экспериментальных данных, лабораторных опытов, тестированием разработанной модели и сопоставлением полученных результатов численных расчетов с ранее опубликованными данными, апробацией СУ на срезе архивных данных исследуемого технологического процесса сгущения, проверкой алгоритма параллельного поиска оптимума функции, имеющей не единственное решение, на тестовых функциях.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 9 печатных работах, в том числе в 4 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, получено 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Апробация работы. Содержание и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на XV Международной научно-практической конференции «Техника и технология: новые

перспективы развития» (г. Москва, 20.11.2014), научных форумах с международным участием «Неделя науки СПбГПУ» (г. Санкт-Петербург, 01-06.12.2014, 30.11-05.12.2015), Международных научно-практических конференциях (Германия, г. Фрайберг, 17-19.06.2015, 08-09.06.2016); на разработанную программу для ЭВМ получено свидетельство о государственной регистрации № 2017611596.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка символов, списка условных обозначений и аббревиатур, списка литературы и приложения. Работа содержит 192 страницы машинописного текста, 102 рисунка, 10 таблиц и список литературы из 115 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ научно-технической литературы, существующих СУ процессом сгущения, выявлены их преимущества и недостатки, определен метод управления на основе прогнозирующей модели, обоснована необходимость распределения питающего потока между параллельными сгустителями.

Во второй главе описаны проведенные экспериментальные исследования, по результатам которых были идентифицированы параметры модели.

Третья глава посвящена вопросам моделирования процесса сгущения КШ, содержит математические описания зон флокуляции, стесненного осаждения и эффективного сжатия осадка, осветления; представлен алгоритм реализации обобщенной математической модели сгустителя, учитывающей переменное поперечное сечение аппарата, зарастание и зашламливание сгустителя в процессе эксплуатации; представлен результат исследования влияния распределения частиц по размерам в питающей пульпе сгустителя и действие перемешивающих граблин на массовый расход твердой фракции с осветленным раствором.

В четвертой главе представлены результаты работы САУ параллельно работающими сгустителями на базе управляющего уст-

ройства с прогнозирующей моделью и блоком оптимизации на основе алгоритма клонального отбора.

В заключении сформулированы основные выводы, результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

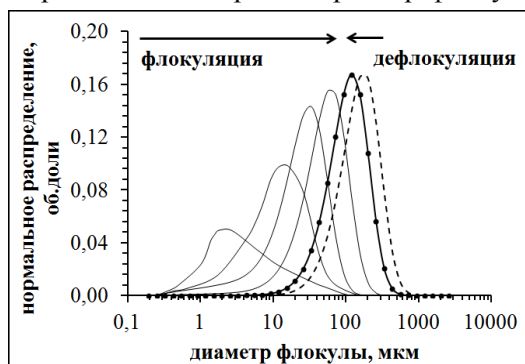
1. Обобщенная математическая модель сгустителя, состоящая из моделей зоны агрегации твердой фракции питающей суспензии, зоны стесненного осаждения и эффективного сжатия осадка, зоны осветления, учитывает параметры зарастания сгустителя в процессе его эксплуатации и позволяет прогнозировать содержание твердой фракции в нижнем продукте в диапазоне 0.01-0.10 об.долей, в верхнем сливе в диапазоне 0-1000 мг/л.

Обобщенная модель сгустителя

Обобщенная модель включает в себя модели зон агрегации частиц, осаждения и уплотнения осадка, зоны осветления.

Модель зоны флокуляции

Модель процесса флокуляции питающей суспензии позволяет рассчитывать средний размер флокул (D_{floc} , мкм) в зависимости



от объемного расхода флокулянта (Q_{floc} , м³/ч) и его разбавления. Зависимость D_{floc} установлена по результатам экспериментов в программе «Excel Population Balance Model» («AMIRA p266 project: Improving thickening technology») и имеет следующий вид:

Рисунок 1 – Диапазон распределения флокул

$$D_{floc} = k \cdot (840.2 + 0.701 \cdot Q_{floc} - 250.7 \cdot \varphi_0 - 0.00019 \cdot Q_{floc}^2 - 0.081 \cdot Q_{floc} \cdot \varphi_0 + 22.8 \cdot \varphi_0^2) \quad (1)$$

где k – коэффициент сферичности флокулы, φ_0 – содержание твердой фракции в питающей пульпе. Среднеквадратичное отклонение (СКО) расчетных значений равно 7 мкм.

В основе программы лежит уравнение баланса и динамики популяций. Средневзвешенный диаметр флокулы равен 158 мкм, диапазон распределения флокул в питающем стакане после флокуляции для исследуемого процесса – 10 – 600 мкм (рисунок 1).

Модель зоны осаждения и уплотнения осадка

Стационарное состояние сгустителя можно представить как:

$$\frac{d\varphi}{dz} = - \frac{\Delta\rho\varphi g}{f_{bk(\varphi)} \cdot \sigma_e(\varphi)} \left(\frac{Q}{S(z)} \varphi + f_{bk}(\varphi) - \frac{Q}{S(z)} \varphi_{UF} \right), 0 < \varphi < 1 \quad (2)$$

где φ – содержание твердой фракции, об.доли; Q – объемный расход пульпы, м³/ч; $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$, ρ_s – плотность твердой фазы – 3200 кг/м³, ρ_f – плотность жидкой фазы – 1240 кг/м³; φ_{UF} – содержание твердой фракции в сгущенном продукте, об.доли, $S(z)$ – площадь поперечного сечения сгустителя, м².

Предел текучести при сжатии описывается выражениями:

$$\sigma_e(\varphi) = \begin{cases} \text{Const}, & \varphi < \varphi_c \\ \sigma_0 \left(\left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^c - 1 \right), & \varphi \geq \varphi_c \end{cases} \quad (3)$$

где σ_0 , c – эмпирические коэффициенты, характеризующие предел текучести при сжатии осадка – 2 Па и 6.5 соответственно, φ_c – критическая концентрация – 0.028 об.доли.

Функция плотности потока Кинча равна:

$$f_{bk}(\varphi) = U_{s\infty} \varphi (1 - \varphi)^n \quad (4)$$

Скорость Стокса в обобщенной модели изменяется в зависимости от D_{floc} по формуле:

$$U_{s\infty} = \frac{D_{floc}^2 \cdot g \cdot \Delta\rho}{18 \cdot \mu} \quad (5)$$

где n – индекс стесненного осаждения – 89.39; μ – вязкость пульпы при рабочей температуре – 0.0021 Па·с.

Стационарное состояние в зоне разгрузки $z = 2.35$ м описывается содержанием твердой фазы в сгущенном продукте φ_{UF} . Расчет профиля концентрации происходит в направлении уменьшения глубины при условии, что $\varphi_{UF} > \varphi_c$, иначе процесс моделируется как стесненное осаждение с постоянной концентрацией во всех зонах.

Модель решена с помощью алгоритма, разработанного в программном продукте MatLab (рисунок 2, приложение 1) и включает в себя:

- модель процесса флокуляции;
- поправочный коэффициент Лепле (K_L) для расчета скорости Стокса флоккулы. Предельная скорость движения частицы используется для расчета числа Рейнольдса частицы, по которому из корреляционных соотношений, выведенных для данных по массоотдаче к неподвижным сферическим частицам, находится поправочный коэффициент Лепле;
- коэффициент сферичности флоккулы (k), влияющий на профиль концентрации в сгустителе (рисунок 3а);
- расчет профиля концентрации в сгустителе с переменной площадью поперечного сечения ($S(z)$, m^2), т.е. учитывается цилиндрическая и коническая части аппарата. Профиль концентрации, полученный при одинаковых начальных исходных данных, для цилиндрического и цилиндроконического сгустителя представлен на рисунке 3б. В разработанной модели по профилю концентрации рассчитывается высота постели сгустителя (H_{bed} , м)

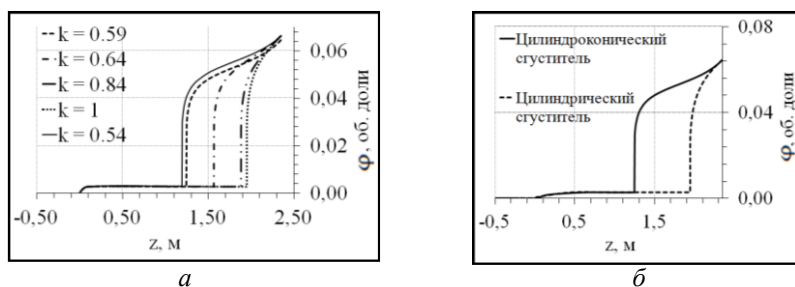


Рисунок 3 – Профиль концентрации в сгустителе

Модель зоны осветления

Концентрация твердой фракции (C_{OF} , мг/л) в осветленном сливе сгустителя выражена следующим образом:

$$C_{OF} \approx K \cdot K' \cdot b_{PSD} \cdot \frac{Q_F \cdot \varphi_F}{S_0 \cdot \left(\frac{Q_D}{S_0} + U_{Sc} \right)} \quad (6)$$

где Q_F – объемный расход питающей пульпы, м³/ч; φ_F – содержание твердого в питании, об.доли; Q_D – объемный расход сгущенного продукта, м³/ч; S_0 – площадь поперечного сечения цилиндрической части сгустителя, м²; K, K', b_{PSD} – безразмерные поправочные коэффициенты, физический смысл которых описан далее в работе.

Коэффициент b_{PSD} позволяет учитывать влияние диапазона распределения флокул, образующихся в процессе флокуляции в питающем стакане, на массовый расход твердой фракции с верхним сливом сгустителя. Получен по результатам серии экспериментов в программном комплексе ANSYS Fluent при сопоставлении осаждения суспензий, содержащих монодисперсные и полидисперсные частицы, и равен 1.17.

Коэффициент K отражает пропорциональную зависимость выхода твердой фракции в осветленный слив от концентрации твердой фракции в точке питания для образцового сгустителя, который характеризуется концентрацией твердой фракции в верхнем сливе и содержанием твердого в сгущенном продукте в заданных диапазонах и максимальной производительностью. Зависит от исследуемого технологического процесса и может быть определен при сравнении расчетных и архивных данных. Для исследуемого процесса $K=0.14$.

K' – поправочный коэффициент, позволяющий учитывать зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации.

Известные модели управления сгустителями не отражают зарастание аппарата в процессе его эксплуатации, как следствие управление по рассчитанным моделям с увеличением зарастания сгустителя не справляется с поддержанием целевой функции на заданном значении. Коэффициент K' , как и мутность верхнего слива сгустителя, сильно коррелирует с параметрами «высота граблин»

(H_{rake} , см) и «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин» (I , А). $K' \cong 1$ для образцового сгустителя.

С помощью регрессионного анализа получена зависимость коэффициента K' от параметров, характеризующих зарастание и зашламливание сгустителя в процессе эксплуатации:

$$K' = 2.503 + 0.574 \cdot I - 0.069 \cdot H_{rake} - 9.568 \cdot I^2 - 0.021 \cdot I \cdot H_{rake} + 0.323 \cdot I^3 + 0.056 \cdot I^2 \cdot H_{rake} \quad (7)$$

Диапазон изменения H_{rake} – [5-28 см], I – [0.38-24.8 А].

СКО C_{OF} по выведенной зависимости 25-100 мг/л в зависимости от степени зашламливания сгустителя.

Обобщенная динамическая модель сгустителя

Структура динамической модели сгустителя представлена простой каскадной моделью Винера-Гаммерштейна и состоит из последовательно соединенных динамических линейных элементов (ДЛЭ), представленных в работе двумя апериодическими звеньями первого порядка, и статического нелинейного элемента (СНЭ), представленного стационарной нелинейной моделью, выраженной уравнениями (1)-(7). ДЛЭ модели воспроизводит динамические свойства исследуемого ОУ, СНЭ позволяет рассчитать коэффициент усиления по различным каналам в зависимости от значений переменных состояния ОУ.

На рисунках 4, 5 (приложение 2) сопоставлены расчеты по обобщенной модели и архивные данные по параметрам «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» и «содержание твердого в сгущенном продукте». Коэффициент линейной корреляции R экспериментальных и расчетных данных по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» равен 0.8368, по параметру «содержание твердой фракции в сгущенном продукте» – 0.8447.

2. Управление распределением питающего потока между параллельно работающими сгустителями на базе системы автоматического управления с прогнозирующей моделью и блоком оптимизации на основе алгоритма клонального отбора позволяет стабилизировать содержание твердой фракции в нижнем продукте в диапазоне 0.085-0.095 об.долей, минимизировать сум-

марный массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом, в среднем на 180 кг/ч.

САУ параллельно работающими сгустителями представлена иерархической структурой:

- Блок оптимизации на основе алгоритма клонального отбора представляет собой интеллектуальную надстройку над базами оперативных и исторических производственных данных. Результат работы блока оптимизации – подбор оптимальных значений объемных расходов питающей пульпы (Q_{Fi} , м³/ч) на каждый из параллельных сгустителей и уставок для предиктивных регуляторов по параметру «концентрация твердой фазы в верхнем сливе» для каждого из сгустителей. Алгоритм реализован в виде блок-схемы в программном продукте GE Proficy Architect, который является компонентом программного комплекса GE Proficy CSense (рисунок 8, приложение 3) и выполняется в режиме реального времени. Перераспределение питающего потока между параллельными сгустителями достигается за счет минимизации критерия оптимальности J:

$$J = \frac{\sum_{i=1}^5 (Q_{Fi} - Q_{UFi}) C_{OFi}}{\sum_{i=1}^5 Q_{Fi} \cdot \varphi_F}, Q_{F\Sigma} = \text{Const} \quad (8)$$

где Q_{Fi} – объемный расход питающей пульпы, м³/ч, Q_{UFi} – объемный расход сгущенного продукта, м³/ч, φ_F – содержание твердой фракции в питающей пульпе, об.доли.

- Управление целевыми параметрами «содержание твердой фракции в сгущенном продукте (φ_{UF} , об. доли)» и «концентрация твердой фазы в верхнем сливе (C_{OF} , мг/л)» в каждом сгустителе строится на базе предиктивного управления (МРС – Model Predictive Control). Регулятор МРС с прогнозирующей моделью для каждого сгустителя подбирает наилучшие управляющие воздействия по параметрам «объемный расход сгущенного продукта (Q_{UF} , м³/ч)», «объемный расход флокулянта ($Q_{флос}$, м³/ч)» для каждого сгустителя.

Общая структурная схема принципа построения САУ параллельными сгустителями представлена на рисунке 6, где Y – вектор выходных регулируемых величин, V_i – вектор измеряемых возмущающих воздействий, $V_{ни}$ – вектор не измеряемых возмущающих воздействий, U – вектор управляющих воздействий, $i = 1..5$:

Приложение 1

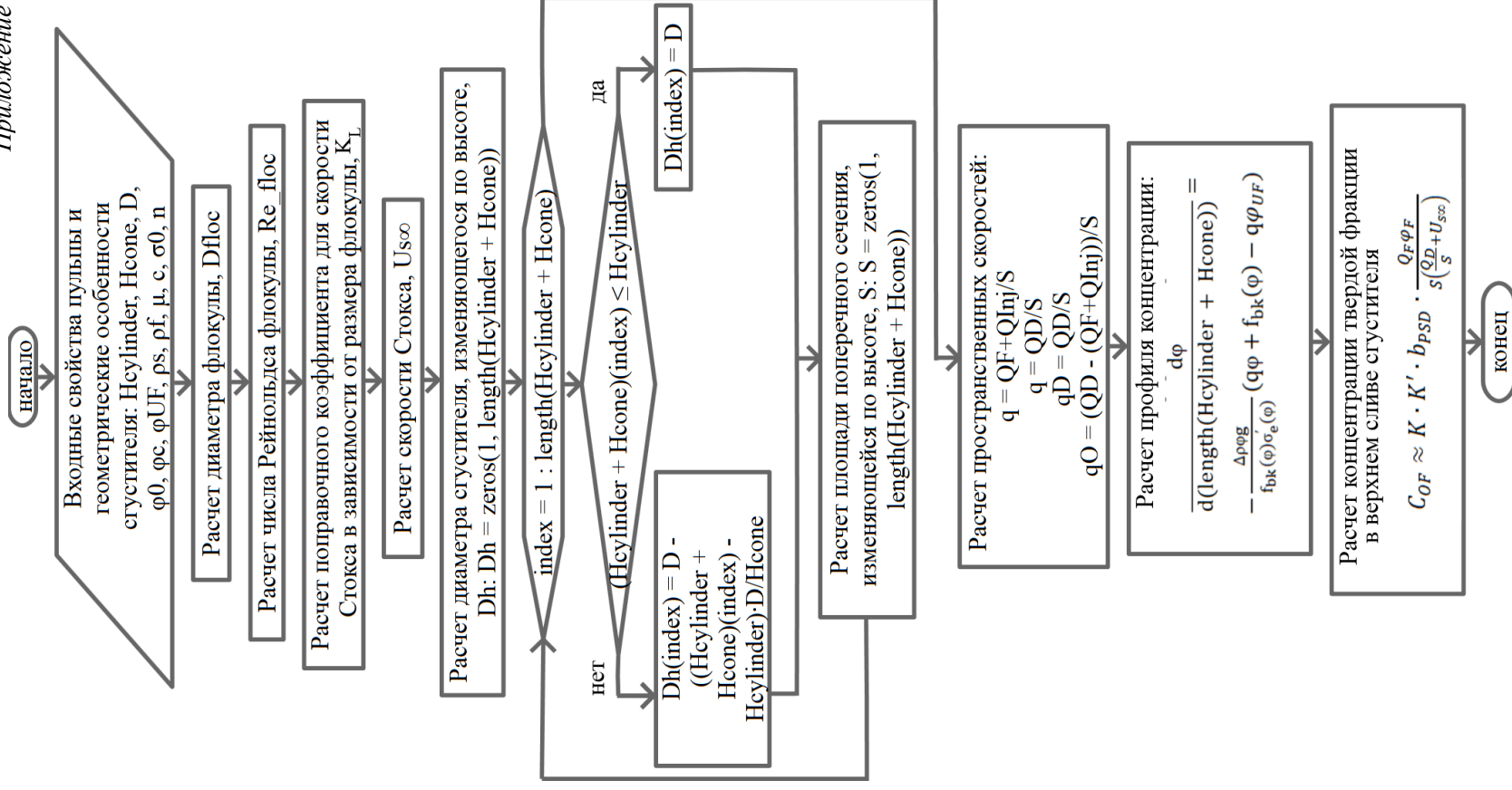


Рисунок 2 – Блок – схема алгоритма решения модели зоны осадения и уплотнения осадка

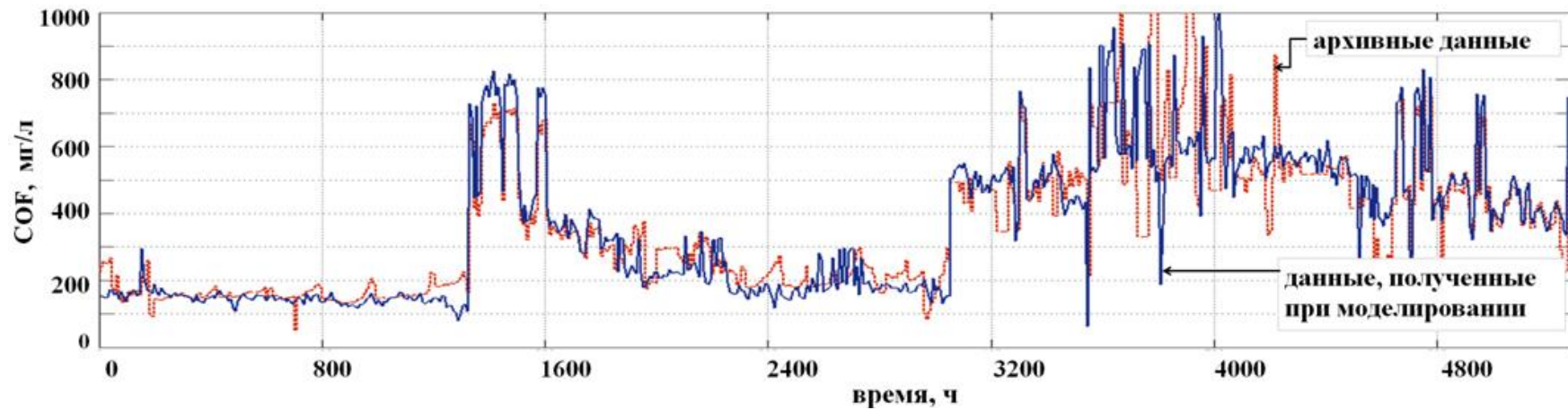


Рисунок 4 – Сопоставление результатов расчетов по обобщенной модели и архивных производственных данных по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе»

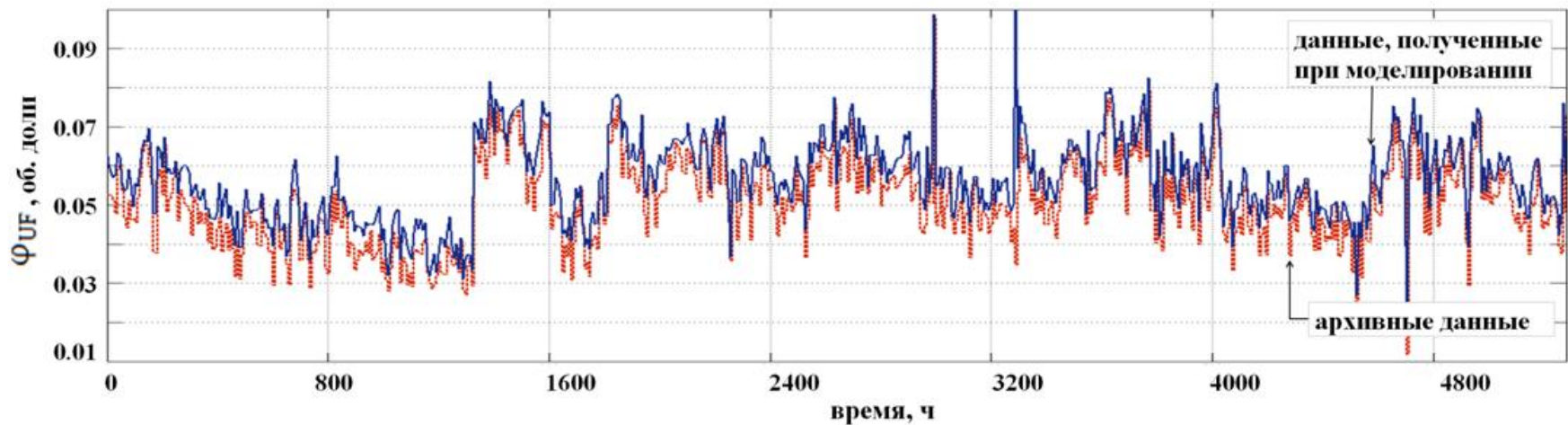


Рисунок 5 – Сопоставление результатов расчетов по обобщенной модели и архивных производственных данных по параметру «содержание твердой фракции в сгущенном продукте»

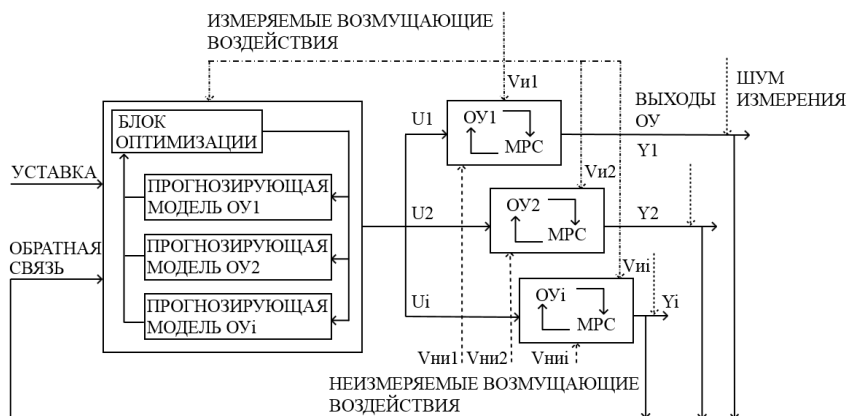


Рисунок 6 – Структурная схема САУ

- V_i : содержание твердой фракции в питающей пульпе; средний стоксовский диаметр флоккулы, который оценивается по формуле (1);
- V_{ni} : распределение частиц по размерам в питании; pH пульпы; температура питающей пульпы; распределение образующихся в процессе флокуляции флоккул;
- U : объемный расход питающей пульпы в каждый из сгустителей (Q_{Fi} , м³/ч), уставка для предиктивного регулятора по параметру «концентрация твердой фазы в верхнем сливе (C_{OF} , мг/л)» для каждого из сгустителей;
- Y : содержание твердой фракции в сгущенном продукте; концентрацию твердой фазы в верхнем сливе.

Интеграция MPC в САУ

Синтез СУ сгустителем на базе MPC регулятора осуществлен в среде GE Proficy Architect. На рисунке 7 (приложение 3) представлена СУ одним сгустителем на базе MPC регулятора с линеаризованной прогнозирующей моделью ОУ. Обмен данными происходит через технологию OPC. В SCADA - систему передаются рекомендуемые уставки по Q_{UF} и $Q_{фloc}$. ОУ для тестирования САУ пред-

ставлен как обобщенная динамическая модель сгустителя, реализованная в блоке скрипта на языке C#. Дискретность работы СУ – 2 ч.

САУ параллельно работающими сгустителями

САУ параллельными сгустителями на базе алгоритма клонального отбора распределения питающего потока между аппаратами в зависимости от степени их зарастания и зашламливания реализована в программном пакете GE Proficy CSense в виде блок-схемы (рисунок 8, приложение 3). Для включения в диаграмму блоков алгоритма клонального отбора использовался блок скрипта на языке C#. Перерасчет объемных расходов питающей пульпы и уставок для предиктивного регулятора по S_{OF} в каждый сгуститель происходит 1 раз в 8 ч, что позволяет контролировать не только зарастание сгустителей в процессе их длительной эксплуатации, но и отслеживать периодическое зашламливание граблин. САУ рассчитывает коридор оптимизации, т.е. на рассчитываемые по алгоритму параметры Q_{Fi} накладываются ограничения с целью ограничить изменения приращения расходов пульпы за один шаг управления. Модели ОУ в САУ переобучаются/дообучаются в режиме оффлайн с помощью блока тренера при изменении характеристик пульпы.

Принцип работы алгоритма клонального отбора

САУ распределяет питающий поток между параллельными сгустителями за счет минимизации критерия оптимальности (J^*), описанного в формуле (8):

$$J^* = \min_{U'} [J(U', V)], U' = [Q_{F1}, Q_{F2}, Q_{F3}, Q_{F4}, Q_{F5},] \quad (9)$$

$$\text{при ограничении: } \Phi_{UF_min} \leq \Phi_{UF} \leq \Phi_{UF_max} \quad (10)$$

Алгоритм использует пространство, где U' представлены в двоичном коде $x_i = \text{code}(U'_i)$ с длиной массива L в 7 бит. Длина массива бит для хранения всех U'_i в двоичном коде $np = L \cdot n$, где n – число управляющих параметров. Диапазон изменения множества $X_{\text{vect}} = [x_1, x_2, \dots, x_n] = [\text{code}(U'_1), \text{code}(U'_2), \dots, \text{code}(U'_n)]$ определяется пространством $[0 \dots 2^{np} - 1]$, где U'_i принадлежит диапазону $[0 \dots 2^L - 1]$. Поиск оптимальных U'_i происходит в X_{vect} . Алгоритм

относится к классу алгоритмов параллельного поиска и справляется с поиском глобального минимума.

Шаг 1. Создание вне цикла матрицы клеток памяти $M[i, j]$, где $i=1:7$ – количество структур в M , $j=1:np$. В каждую структуру закладываются начальные значение критерия J_{\max} и показателя степени близости M_{aff} к текущему минимальному антигену J .

Шаг 2. Создание вне цикла аналогично *шагу 1* матрицы V -клеток $[i, j]$, где $i=1:10$ – количество структур в массиве V , $j = 1:np$.

Шаг 3. Создание популяции V -клеток по клеткам M : если $M_{\text{aff}} > V_{\text{aff}}$, то структура массива M внедряется на i -ое место V -клетки. Формируется массив структур $V_{i,j}$ по массиву структур M : $V_{i,j} := M_{i,j}$. Если значения всех элементов массива структур $V_{i,j}$ близки друг к другу с определённым допуском α , то остановить поиск, иначе – переход к следующему подшагу. Для разнообразия при поиске случайно генерируются новые три V -клетки для $i = 8:10$.

Шаг 4. Выполнение алгоритма стимуляции и супрессии V -клеток T -клетками. Если наблюдается высокое сходство, то i -структура $V_{i,j}$ удаляется из популяции.

Шаг 5. Создание начальной популяции антител Ab $[100, np]$.

Шаг 6. Мутация пептидов антител в соответствии с шаблоном вероятности «изменчивости» T .

Шаг 7. Отбор десяти случайных мутировавших антител для дальнейшего поиска значений Q_{fi} , при которых J стремится к \min .

Шаг 8. Декодирование из двоичной системы в десятичную систему счисления и масштабирование в заданный диапазон изменения физических единиц управляющих параметров сгустителя: $[U'_1, U'_2, \dots, U'_n] = \text{decode}(X_{\text{vect}}) = \text{decode}[x_1, x_2, \dots, x_n]$.

Шаг 9. Расчёт Q_{Fi} по десяти вариантам случайных мутировавших антител. Проверка параметров модели на ограничения. Задача условной минимизации решается за счет назначения целевой функции максимального значения J_{\max} при максимально известных параметрах ОУ. Значения целевой функции сохраняются в элементе Ab_i , где $i = 1:10$. Самый сильный антиген определяет минимальное значение J по поставленной задаче. Если $Ab_i < J_{\min}$, то $J_{\min} := Ab_i$:

$Ab_{i\text{aff}} = \frac{J_{\min}}{Ab_{i,J}}$, $V_{i\text{aff}} = \frac{J_{\min}}{V_{i,J}}$. Результат вычисления показывает степень близости антитела и антигена.

Шаг 10. Сортировка антител по степени их близости к антигену с помощью метода пузырька.

Шаг 11. Формирование клеток памяти на основе лучших антител и переход к шагу 3.

По завершении поиска алгоритм выдает оптимальные управляющие воздействия (Q_{Fi}) существующим локальным СУ сгустителями и МРС регуляторам в качестве известных возмущений. По рассчитанным Q_{Fi} по обобщенной модели рассчитываются достигаемые C_{OFi} , которые передаются в качестве уставок МРС регуляторам.

На рисунках 9, 12 (приложение 4) сопоставлены архивные данные и данные, полученные после оптимизации процесса сгущения по целевым параметрам φ_{UF} и C_{OF} на выходе с ветки сгущения. Гистограммы разброса архивных значений и значений, полученных после оптимизации процесса, представлены на рисунках 10, 11, 13, 14 (приложение 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненных исследований:

1. Выявлены основные влияющие факторы на кинетику процессов сгущения КШ. Проанализированы существующие СУ процессом сгущения, определен метод управления на основе прогнозирующей модели и необходимость распределения питающего потока между параллельными сгустителями;

2. Проведены экспериментальные исследования, по результатам которых были идентифицированы параметры модели: скорость Стокса – 0.013 м/с, средний стоксовский диаметр частицы в питании – 6.5 мкм, распределение частиц по размерам – 0.3-100 мкм, индекс стесненного осаждения – 89.39, критическая концентрация – 0.0304 об.доли;

3. Проанализированы архивные производственные данные с помощью аналитического инструмента GE Proficy Troubleshooter. Получены статические характеристики целевого параметра «кон-

центрация твердой фазы в верхнем сливе» от основных измеряемых параметров. Проведен корреляционный анализ измеряемых параметров исследуемого ОУ;

4. Разработана обобщенная динамическая модель, включающая в себя модель флокуляции твердой фазы, модель зоны стесненного осаждения и эффективного сжатия осадка, модель зоны осветления. Обобщенная модель прогнозирует содержание твердой фракции в нижнем продукте в диапазоне 0.01-0.10 об.долей, в верхнем сливе в диапазоне 0-1000 мг/л и учитывает зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации;

5. Модель агрегации твердой фазы позволяет рассчитывать средний размер флокул, образующихся в процессе флокуляции в питающем стакане;

6. Модель зоны стесненного осаждения и уплотнения осадка позволяет рассчитывать профиль концентрации с учетом переменной площади поперечного сечения сгустителя. Учет при моделировании процесса сгущения конической части сгустителя для исследуемого ОУ позволяет на 30 % уменьшить погрешность при расчете высоты постели;

7. Модель зоны осветления строится на основе теории осаждения Кинча, дополненной поправочными коэффициентами. Рассчитан коэффициент, отражающий пропорциональную зависимость выхода твердой фракции в осветленный слив от концентрации твердой фракции в точке питания для образцового сгустителя, и равный 0.14. Выведена зависимость мутности верхнего слива сгустителя от параметров «высота граблин» и «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин», которые характеризуют зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации. Рассчитан поправочный коэффициент для исследуемого ОУ, позволяющий компенсировать ошибку моделирования при расчете мутности верхнего слива с моночастицей на входе модели. Используемые программные инструменты – Curve Fitting Toolbox от MatLab, Excel Population Balance Model (проект «AMIRA p266 project: Improving thickening technology»), ANSYS Fluent;

8. Программа для ЭВМ «Программный тренажер для моделирования процесса сгущения» может быть использована для решения задачи одномерного моделирования процесса осаждения твердой фракции, флокулированной суспензии в сгустителе цилиндрической формы с целью вычисления профиля концентрации в сгустителе;

9. Синтезирована САУ параллельно работающими сгустителями на переделе сгущения и промывки КШ, которая включает в себя регуляторы с прогнозирующей моделью (МРС) для каждого из сгустителей и блок оптимизации на основе алгоритма клонального отбора. САУ стабилизирует содержание твердой фракции в сгущенном продукте и минимизирует массовый расход твердого с верхним сливом на выходе с ветки сгущения в заданных технологическим регламентом диапазонах. САУ реализована в программной среде GE Proficy CSense.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. **Федорова, Э.Р.** Анализ существующих систем управления процессом сгущения красного шлама / **Э.Р. Федорова, А.Ю. Фирсов** // М.: Издательство «Спутник +». – Естественные и технические науки. – № 11-12(78) . – 2014. – с. 307-315.

2. **Федорова, Э.Р.** Качественные и количественные характеристики красного шлама. — М.: Издательство «Горная книга». — Моделирование процесса сгущения красного шлама. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 33) . — 2016. — с. 13-27.

3. **Федорова, Э.Р.** Моделирование процесса сгущения красного шлама / **Э.Р. Федорова, А.Ю. Фирсов** // М.: Издательство «Горная книга». — Моделирование процесса сгущения красного шлама. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 33) . — 2016. — с. 3-12.

4. **Федорова, Э.Р.** CFD моделирование сгустителя красных шламов. – Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. – 2016. – № 12 (54). – Часть 3. – с. 194-200.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611596. Программный тренажер для моделирования процесса сгущения / **Э.Р. Федорова, А.Ю. Фирсов, К.А. Затуловский** // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 7 февраля 2017 г.

6. **Федорова, Э.Р.** Система управления сгустителем красных шламов в программных пакетах GE Proficy / **Э.Р. Федорова, А.Ю. Фирсов**// М.: Издательство «Спутник +». – Техника и технология: новые перспективы развития. – Материалы XV Международной научно-практической конференции (20.11.2014) . – 2014. – с. 95-100.

7. **Федорова, Э.Р.** Система управления сгустителем красных шламов/ **Э.Р. Федорова, А.Ю. Фирсов**// СПб.: Издательство Политехнического университета. – Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ». – Материалы научно-практической конференции. – Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ. – Ч. 2.– 2015. – с. 243-245.

8. **Федорова, Э.Р.** Система управления переделом сгущения и промывки красного шлама, учитывающая распределение нагрузки по агрегатам и плотность «упаковки» частиц в сгустителях / **Э.Р. Федорова, А.Ю. Фирсов**// СПб.: Издательство Политехнического университета. – Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ». – Материалы научного форума с международным участием. – Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ.– Ч. 2.– 2015. – с. 38-41.

9. **Fedorova, E.R.** Red mud thickener control system / **E.R. Fedorova, A.U. Firsov** // Publ. office: International University of Resources. – Scientific Reports on Resource Issues. – Edited by Technische University Bergakademie Freiberg. – Germany. –V. 1. – 2015. – p. 159-161.

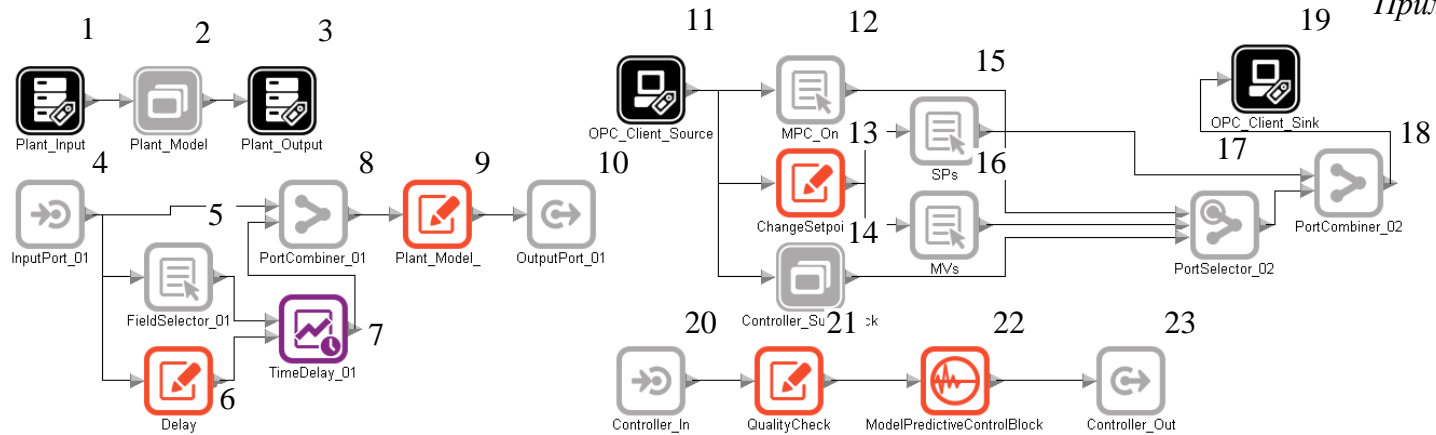


Рисунок 7 – Модель ОУ и MPC регулятор в GE Proficy Architect, где 1,3,11,19-блоки обмена данными, 2-подсистема модели ОУ, 4,10,20,23-вход/выход блока подсистемы, 5,6,7-реализация транспортного запаздывания, 8,18-сумматор, 9-модель ОУ на C#, 12-ручное/автоматическое управление MPC, 13,15,16-задание уставок и управляющих воздействий, 14-подсистема MPC, 17-селектор параметров, 21-редактирование имен сигналов для избежания конфликта, 22-блок MPC

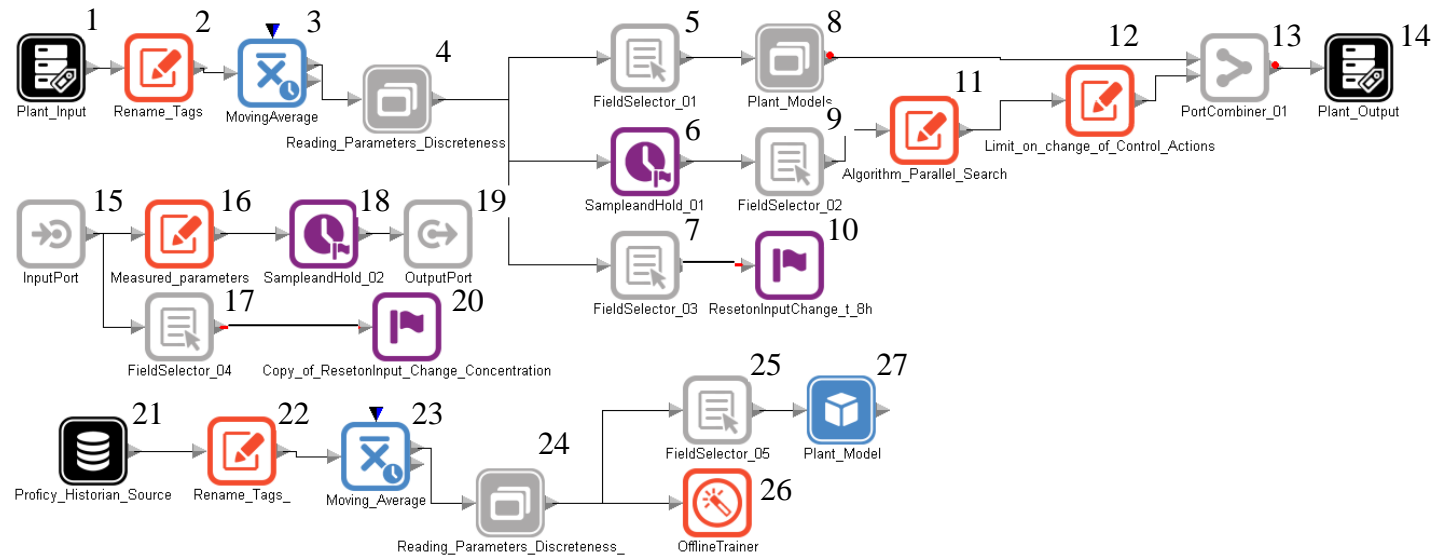


Рисунок 8 – САУ параллельными сгустителями в GE Proficy Architect, где 1,14,21- блоки обмена данными, 2,16,22-блок подготовки данных, 3,23-скользящее среднее, 4,24-подсистема для усреднения параметров с различной дискретностью, 5,7,9,17,25-селектор параметров, 8-подсистема моделей сгустителей с MPC регуляторами, 6,18-фиксатор считанных/рассчитанных параметров, 10,20-триггер по заданному условию, 11-алгоритм параллельного поиска минимума, 12-коридор оптимизации, 13-сумматор, 15,19- вход/выход блока подсистемы 4/24, 26-оффлайн тренер, 27-шаблон подсистемы 8

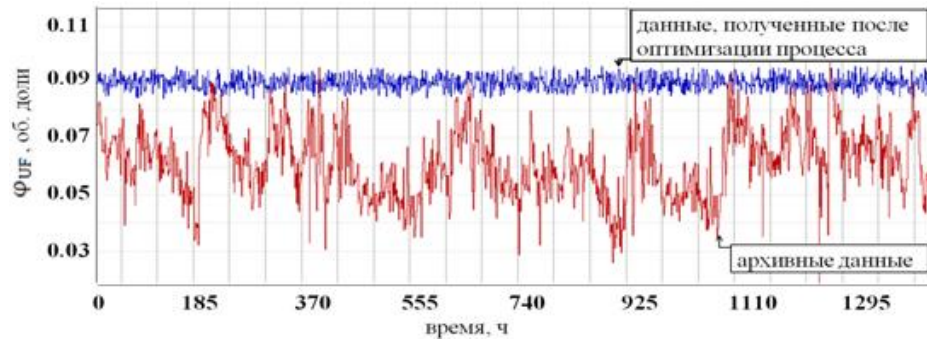


Рисунок 9 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных после оптимизации процесса, по параметру «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения

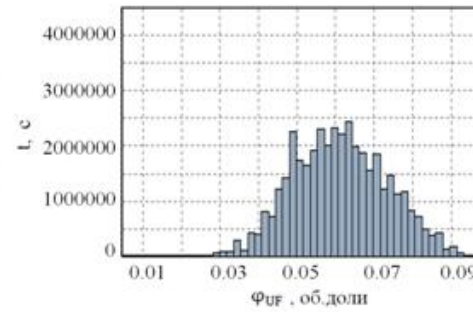


Рисунок 10 – Гистограмма разброса значений по параметру «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения после оптимизации процесса

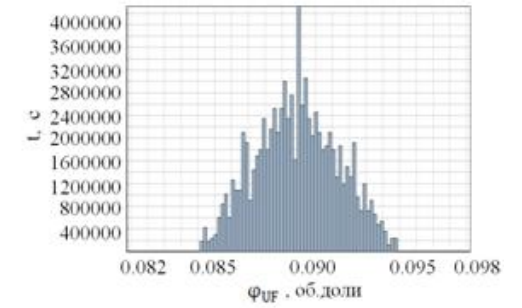


Рисунок 11 – Гистограмма разброса архивных значений по параметру «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения

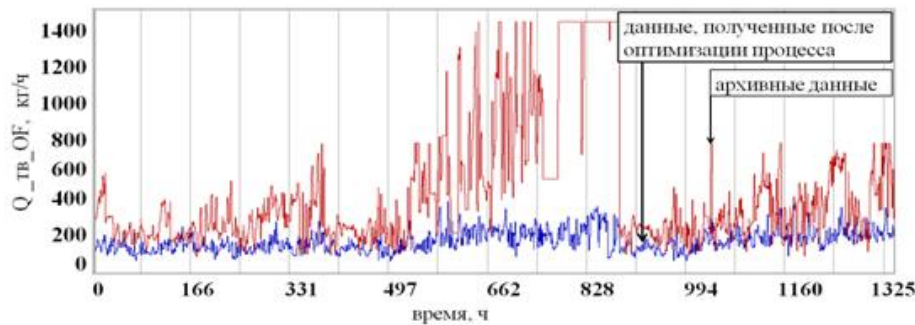


Рисунок 12 – Суммарный массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом с ветки сгущения, до и после оптимизации процесса в условиях меняющихся исходных характеристик пульпы

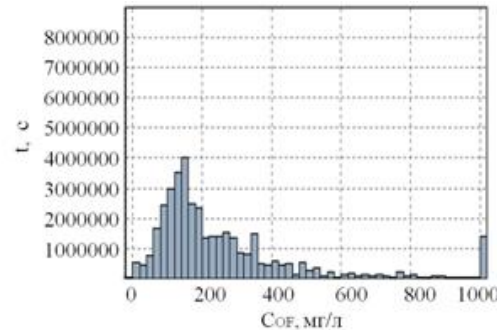


Рисунок 13 – Гистограмма разброса архивных значений по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» на выходе с ветки сгущения

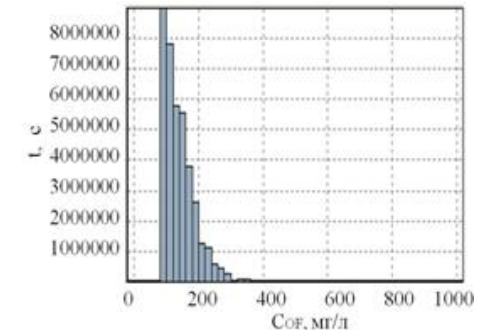


Рисунок 14 – Гистограмма разброса значений по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» на выходе с ветки сгущения после оптимизации процесса