

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

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Научный руководитель:
кандидат технических наук
Фирсов Александр Юрьевич**

Санкт - Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ КРАСНОГО ШЛАМА.....	12
1.1 Процесс Байера.....	12
1.1.1 Выщелачивание	15
1.1.1.1 Измельчение	15
1.1.1.2 Обескремнивание	15
1.1.1.3 Автоклавное выщелачивание.....	15
1.1.2 Сгущение и промывка	16
1.1.3 Декомпозиция	17
1.1.4 Кальцинация	18
1.2 Процесс сгущения красного шлама.....	18
1.2.1 Сгуститель.....	20
1.3 Теория сгущения	21
1.3.1 Процесс динамического сгущения. Теория седиментации Кинча.....	22
1.3.1.1 Периодический процесс седиментации	22
1.3.1.2 Непрерывный процесс седиментации.....	23
1.3.2 Факторы, влияющие на процесс сгущения	25
1.3.3 Существующее оборудование для обезвоживания пульп	26
1.4 Системы управления процессом сгущения красного шлама	30
1.5 Управление параллельными сгустителями	41
1.6 Теоретические сведения об искусственной иммунной системе	42
1.6.1 Обучение с подкреплением и иммунная память	44

1.6.2 Созревание аффинности	46
1.6.3 Иммунная оптимизация.....	47
1.7 Выводы по первой главе.....	47
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДУЕМОГО ОБРАЗЦА КРАСНОГО ШЛАМА	49
2.1 Объект управления.....	49
2.2 Методика экспериментальных исследований красного шлама	53
2.2.1 Гранулометрический состав исследуемого красного шлама	54
2.2.2 Определение концентрации красного шлама в исследуемой пульпе.....	56
2.2.3 Седиментационный тест промышленного образца красного шлама	57
2.2.4 Приготовление раствора флокулянта.....	57
2.2.5 Седиментационный тест промышленного образца красного шлама	59
2.2.6 Обработка результатов экспериментальных исследований	59
2.2.6.1 Скорость Стокса. Индекс стесненного осаждения	59
2.2.6.2 Гелевая точка или критическая концентрация.....	68
2.2.6.3 Функция плотности потока Кинча	69
2.3 Выводы по второй главе.....	72
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ	75
3.1 Принцип работы сгустителя – осветлителя.....	75
3.1.1 Начальная скорость осаждения	75
3.1.2 Скорость осаждения агрегировавших частиц в суспензиях.....	77
3.1.3 Уравнение Ричардсона и Заки. Индекс стесненного осаждения	79
3.1.4 Гелевая точка или критическая концентрация.....	81
3.1.4.1 Вычисление гелевой точки.....	82

3.1.5 Сжимаемость осадка (Предел текучести при сжатии)	84
3.1.6 Взаимодействие «твердое вещество – жидкость»	85
3.1.6.1 Взаимодействие «твердое вещество – жидкость» при седиментации.....	86
3.1.6.2 Взаимодействие «твердое вещество - жидкость» при консолидации	87
3.2 Модель сгустителя – осветлителя	88
3.3 Описание технологического процесса сгущения красного шлама.....	90
3.3.1 Контрольно-измерительные приборы.....	92
3.3.2 Анализ и обработка архивных производственных данных	96
3.4 Модель зоны флокуляции	102
3.4.1 Популяционный баланс	103
3.5 Модель зоны осаждения	106
3.5.1 Алгоритм решения модели.....	107
3.6 Модель зоны осветления	112
3.6.1 Расчет коэффициента K	112
3.6.2 Расчет коэффициента K'	114
3.6.3 Робастная регрессия.....	117
3.6.4 Результат обучения	119
3.6.5 Тестирование обученной функции.....	120
3.7 CFD моделирование сгустителя	127
3.7.1 Метод Эйлера- Эйлера.....	128
3.7.2 Модель турбулентности	128
3.7.3 Метод Эйлера-Лагранжа	129
3.7.4 Создание геометрической, сеточной и расчетной модели	131
3.7.5 Анализ расчетов CFD моделирования	134

3.8	Обобщенная модель сгустителя	138
3.8.1	Обобщенная стационарная модель сгустителя	138
3.8.2	Обобщенная динамическая модель сгустителя	139
3.8.3	Результат моделирования	141
3.9	Выводы по третьей главе	146
	ГЛАВА 4 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ СГУСТИТЕЛЯМИ НА БАЗЕ АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА	148
4.1	Система управления сгустителем на базе прогнозирующей модели объекта управления и предиктивного регулятора	150
4.1.1	Интеграция предиктивного регулятора в систему управления	151
4.2	Алгоритм распределения питающей пульпы между параллельными сгустителями	156
4.2.1	Алгоритм клонального отбора	158
4.2.2	Результат работы алгоритма клонального отбора	163
4.3	Система управления параллельно работающими сгустителями на базе алгоритма клонального отбора	164
4.3.1	Результат работы системы управления параллельно работающими сгустителями	166
4.4	Выводы по четвертой главе	171
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	173
	СПИСОК СИМВОЛОВ	176
	СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И АББРЕВИАТУР	178
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	180
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	192

ВВЕДЕНИЕ

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, таких как объемный расход пульпы, объемный расход сгущенного шлама, объемный расход флокулянта, содержание твердого в шламе и т.д. 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. Clevenger, 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 отечественные 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. При работе со сложными нелинейными объектами, как сгустители, необходимо обрабатывать большое количество возможных взаимосвязанных параметров. 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. Данное решение поставленной задачи не описывалось ранее в литературе применительно к процессу сгущения.

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.

Основные задачи исследований:

1. 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;

2. Проведение экспериментальных исследований для идентификации параметров моделирования;
3. Разработка CFD модели сгустителя;
4. Разработка обобщенной математической модели сгустителя.

Методология и методы исследования. 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.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем:

1. 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;
2. Учет при моделировании процесса сгущения конической части сгустителя для исследуемого объекта управления (ОУ) позволяет на 30 % уменьшить погрешность при расчете высоты постели;
3. Разработана CFD модель сгустителя, которая учитывает распределение частиц по размерам в питающей пульпе сгустителя и действие перемешивающих граблин;
4. 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.

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;

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

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, что соответствует $272-304 \text{ кг/м}^3$, 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».

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

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.

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.

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.

Структура и объем 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.

Автор выражает благодарность научному руководителю к.т.н. Фирсову А.Ю. за помощь и поддержку, оказанную при работе над диссертацией.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ КРАСНОГО ШЛАМА

Актуальным направлениям научных исследований процесса сгущения КШ посвящено множество работ [1, 2, 3, 4, 5, 6]. В настоящее время остро стоит проблема комплексного использования составляющих боксита. Одним из таких составляющих является КШ, получаемый при переработке бокситовых руд способом Байера, всевозможные варианты усовершенствования технологий переработки и утилизации которого предлагают специалисты из разных стран мира [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

В работе [14] проведена многомерная статистическая оценка потерь полезных компонентов с КШ при способе Байера. Представленная информация является важным подспорьем для дальнейших исследований в области повышения комплексности переработки бокситового сырья и др. Как известно, комплексная переработка сырья обеспечивает более низкую себестоимость 1 т глинозема по сравнению с традиционными способами [15]. То же самое можно сказать в отношении снижения потерь щелочных реагентов при переработке боксита способом Байера, т.е. полный возврат реагента в процесс и минимальные потери ценных компонентов способствуют снижению себестоимости. Применительно к способу Байера этот резерв заложен в доизвлечении щелочи из КШ и ее возврат в основное производство.

1.1 Процесс Байера

В 1889 г. австрийский химик Карл Байер запатентовал процесс для получения глинозема из бокситовой руды, используя раствор гидроксида натрия. Первые промышленные заводы для производства глинозема на основе процесса Байера были размещены во Франции и Ирландии в 1890-х г.г.

Ранее оксид алюминия получали с использованием процесса Ле Шателье, где боксит смешивают с карбонатом натрия для дальнейшей его кальцинации в обжиговой печи в диапазоне между 1000 - 1100 °С – пирометаллургический

процесс. Продуктом реакции является алюминат натрия, который затем выщелачивают при 80 °С, получают алюминатный раствор для дальнейшего осаждения с использованием углекислого газа из печи. Заводы на основе данного процесса были построены в Европе и США. Процесс Ле Шателье потерял конкурентоспособность с появлением процесса Байера и практически исчез в 1940 г.

Для процесса Байера очень важны химический и минеральный составы бокситов. Наиболее трудно перерабатываемыми являются диаспоровые бокситы, которые требуют большей концентрации каустической щелочи, более высоких температур выщелачивания (280 - 300 °С), а также использования извести для сопряженного выщелачивания при извлечении глинозема. Большинство бокситов являются относительно легко перерабатываемыми - гиббсит, бемит или гиббсито-бемит. Другим ограничивающим аспектом является количество твердого остатка (КШ), выделяющегося в процессе Байера. Процесс Байера состоит из стадий промывки и измельчения бокситов, с последующим каустическим выщелачиванием под высокими давлением и температурой. Полученный щелок содержит раствор алюмината натрия и нерастворенный твердый остаток боксита. Этот остаток называется «КШ». Раствор алюмината натрия перекачивают в резервуар осаждения, в который добавляют мелкие частицы оксида алюминия для интенсификации процесса осаждения частиц оксида алюминия. Выпавшие в осадок частицы в нижней части аппарата извлекаются и проходят через вращающуюся печь при 1100 °С для удаления воды. Продукт представляет собой белый порошок, который является чистым оксидом алюминия. Каустическую соду извлекают и повторно используют в процессе. Этот процесс, который используется для получения глинозема из бокситов, претерпел несколько изменений с момента открытия первого завода в 1893 г. Схема производства глинозема по способу Байера представлена на рисунке 1.1.

Процесс Байера включает в себя четыре этапа: выщелачивание, сгущение и промывка алюминатного раствора, декомпозиция и кальцинирование глинозема.

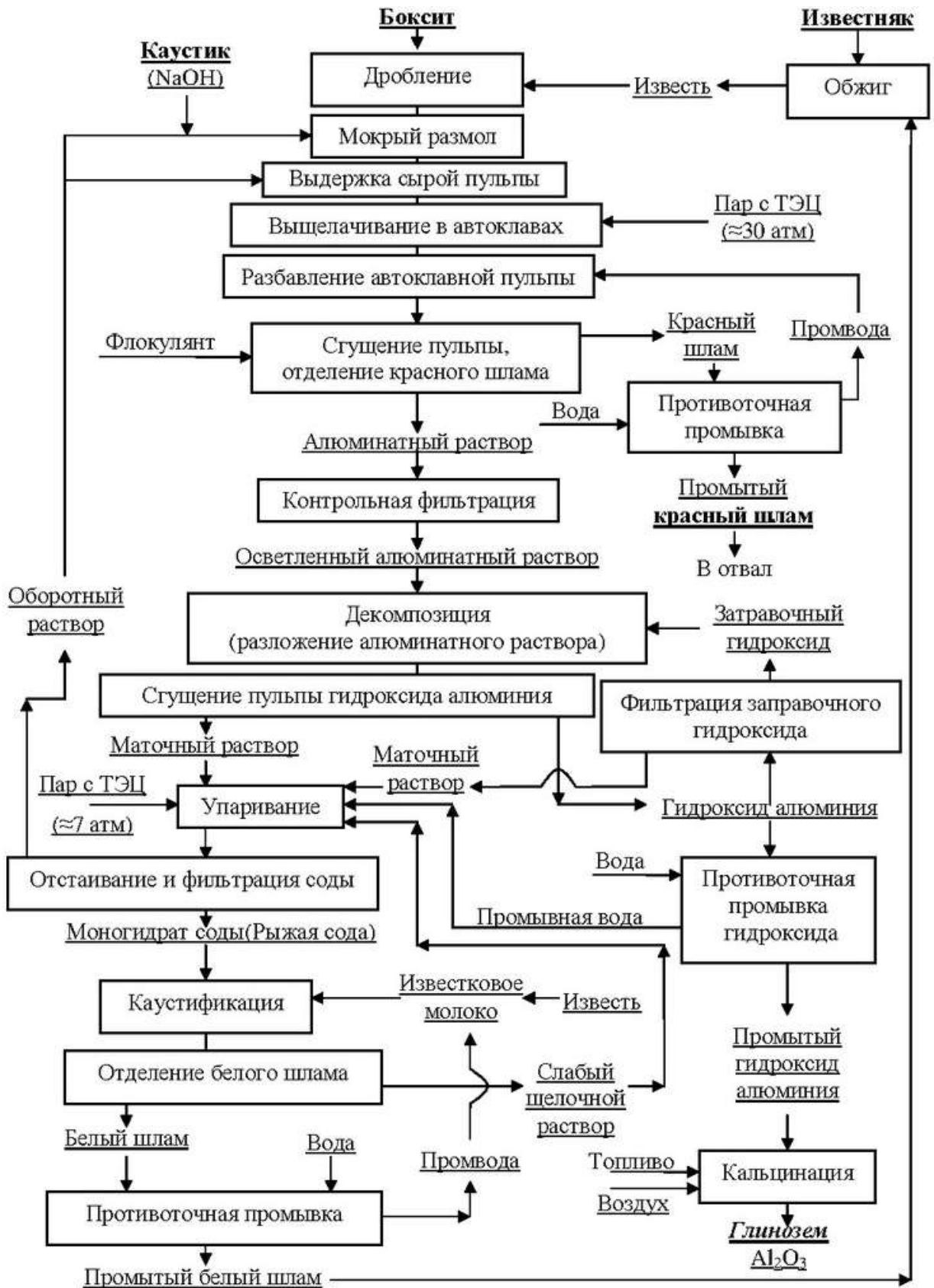


Рисунок 1.1 – Технологическая схема производства глинозема из бокситов по способу Байера [16]

1.1.1 Выщелачивание

Процесс выщелачивания боксита включает в себя несколько этапов: измельчение, обескремнивание и автоклавное выщелачивание.

1.1.1.1 Измельчение

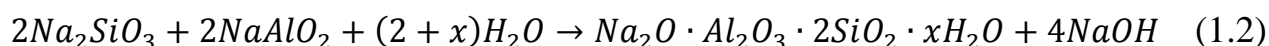
Боксит подвергается предварительному грубому и среднему дроблению. Далее промытый боксит с размером частиц около 20 мм измельчают внутри мельницы мокрого помола, чтобы улучшить контакт «жидкость-твердое тело» во время последующей варки. Рециркулирующий раствор натра и известь добавляют для получения суспензии, способной к перекачиванию.

Мельницы работают в замкнутом цикле с речными или спиральными классификаторами, иногда заменяемые или дополняемые гидроциклонами [16].

1.1.1.2 Обескремнивание

Кремнеземные соединения в бокситах химически «атакуются» каустической содой с последующим образованием твердого продукта под названием «продукт обескремнивания».

Для того чтобы удалить кремнезем из суспензии, ее нагревают паром до 100 °С и выдерживают при атмосферном давлении в зоне предварительной обработки несколько часов при непрерывном перемешивании. Большая часть продуктов обескремнивания затем становится частью остаточного шлама в качестве алюмосиликатов. Данный подпроцесс можно описать следующими реакциями [2]:

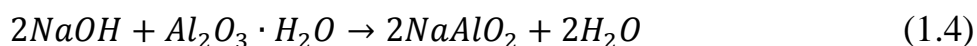


1.1.1.3 Автоклавное выщелачивание

Суспензия, содержащая $Al_2O_3 \cdot xH_2O$ и предварительно нагретая в системе теплообменников, перекачивается насосами высокого давления в автоклавную батарею. После смешивания с паром и раствором каустической соды,

оксид алюминия образует раствор алюмината натрия. Ряд нерастворенных примесей остается, в основном железо, титан и соединения кремния [2].

Современные глиноземные заводы работают с температурой от 200 до 240 °С и при давлении около 30 атм. Параметры, используемые в автоклавных батареях (концентрация, температура и давление), могут изменяться в зависимости от свойств боксита. Теоретически, высокие температуры являются более благоприятными для этого процесса, но существуют недостатки, такие как коррозия и растворение других оксидов, характерных для высоких температур выщелачивания. Из-за высокого давления и температуры, реакции проходят быстро [2]:



В зависимости от времени обработки, процент восстановления достигает 97% от общей выработки оксида алюминия, которая может быть достигнута. После выщелачивания приблизительно 30% (по весу) боксита остается в виде суспензии, образуя красноватую суспензию, содержащую КШ (смесь железа, оксидов титана, диоксида кремния и т.д.). КШ извлекают из варочных котлов и последовательно охлаждают в реакторах с более низкими давлениями. Генерируемое тепло используется для нагрева рудно-каустического раствора [2].

1.1.2 Сгущение и промывка

После стадии экстракции щелок (алюминатный раствор), который содержится в растворенном глиноземе, отделяют от нерастворимого остатка, а затем промывают и фильтруют. При этом извлекается каустик (каустическая сода, гидроксид натрия).

Этап сгущения и промывки включает в себя следующие стадии: сгущение, промывка и фильтрация.

Большая часть остаточных твердых частиц КШ удаляется из пульпы путем осаждения с использованием сгустителей диаметром 30 - 40 м. Флокулянты добавляют для улучшения скорости осаждения и получения алюминатного рас-

твора с минимальным содержанием твердой фракции. Далее КШ промывают водой в каскаде противоточных промывателей, чтобы обеспечить восстановление каустической соды и остаточного оксида алюминия перед откачкой в зону хранения. Процесс промывки обычно включает в себя несколько этапов (от четырех до семи) (рисунок 1.2) [2].

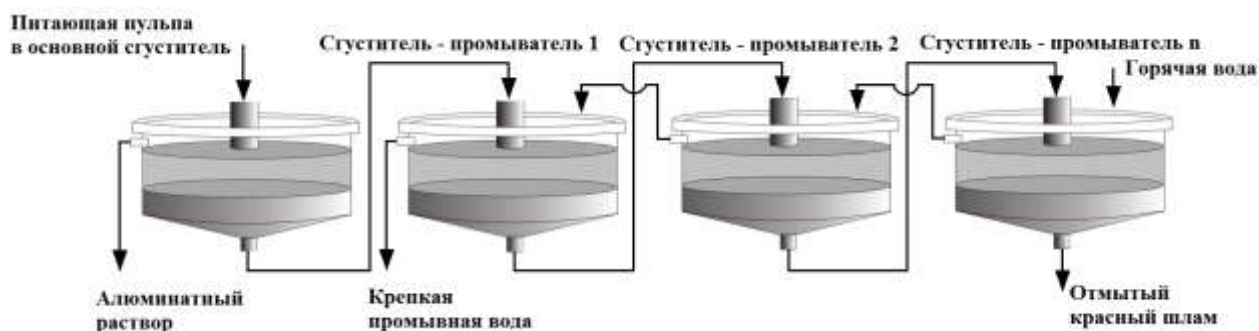
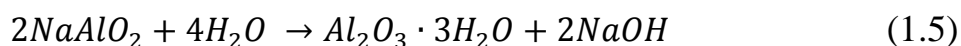


Рисунок 1.2 – Каскад противоточных промывателей [2]

КШ после сгущения и промывки отправляется в отвал (шламовое поле), а верхний слив с первого промывателя, содержащий большое количество Na_2O и Al_2O_3 , подается на разбавление автоклавной пульпы. Алюминатный раствор после сгустителей поступает на контрольную фильтрацию для полного отделения оставшегося КШ, охлаждается до $\sim 70^\circ\text{C}$ в теплообменниках и поступает на следующую стадию – декомпозицию [16].

1.1.3 Декомпозиция

На этой стадии глинозем извлекают из щелока кристаллическим осаждением. Оксид алюминия выпадает в осадок вследствие обратной реакции процесса экстракции [2]:



Гидратную пульпу переводят в резервуары осаждения и добавляют кристаллы тригидрата оксида алюминия, как правило, с небольшим размером частиц, чтобы способствовать росту кристаллов. Смесь перемешивают в резервуарах в течение примерно 3 часов. В ходе этого процесса образуются кристаллы

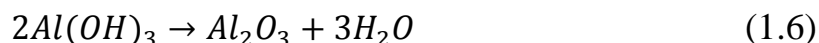
различных размеров. Температура на входе, скорость осаждения кристаллов оксида алюминия и концентрация каустика являются контролируемыми параметрами, используемыми для регулирования размера частиц продукта. Размер частиц является важным параметром в последующей стадии процесса, поэтому контроль этой переменной играет важную роль [2].

Смесь кристаллов различных размеров частиц – гидроксид алюминия отделяется от жидкости и классифицируется по размеру внутри так называемых резервуаров классификации гравитации. Первичные классификаторы используются для крупных частиц, которые являются продуктом гидрата, и впоследствии будут отправлены на кальцинацию. Кристаллы промежуточного и мелкого размера от вторичных и третичных классификаторов, что составляет около 0,75 всей гидроокиси, промывают и возвращают в резервуары осаждения, чтобы они выступали в качестве затравки для процесса декомпозиции [2].

Маточный раствор (верхний слив) из третичного классификатора поступает на выпаривание в многокорпусных вакуумных аппаратах, где концентрация $\text{Na}_2\text{Oк}$ увеличивается до 200-300 кг/м³. Для компенсации потерь в процессе добавляют свежую каустическую соду [2].

1.1.4 Кальцинация

Промытый гидрат высушивают и прокаливают при температуре около 900 - 1200 °С. Процесс прокаливания осуществляется во вращающейся барабанной печи, топочные газы тщательно очищаются от глинозема. Процесс описывается следующей реакцией [2]:



1.2 Процесс сгущения красного шлама

Сгущение и осветление – осаждение одного вещества (твердых частиц) во втором веществе (жидкости). Говоря о процессе осветления, подразумеваются более разбавленные суспензии, чем пульпа, подвергающаяся процессу сгущения. Возможно, именно поэтому осветление было первой из операций, подде-

жащих математическому описанию. В работе Хэйзена в 1904 г. были впервые проанализированы факторы, влияющие на осаждение частиц в разбавленной суспензии. Хэйзен показал, что время выдержки не является фактором при проектировании отстойников, и, что удаляемое твердое вещество пропорционально площади поверхности аппарата, способности твердого вещества к осаждению, и обратно пропорционально скорости потока через резервуар. Изобретение сгустителя Дорра в 1905 г. может считаться начальной точкой становления современного процесса сгущения. Это сделало возможным непрерывное обезвоживание разбавленной суспензии, в результате чего регулярный отвод густой пульпы однородной плотности происходит одновременно с переливом осветленного слива. Гребные лопасти с приводом от подходящего механизма медленно вращающиеся в нижней части резервуара, который обычно имеет небольшой угол по направлению к центру, перемещают сгущенный материал по мере его осаждения к разгрузочному отверстию без перемешивания, которое препятствовало бы осаждению. Первая ссылка на переменные, влияющие на седиментацию, была в 1908 г. Такие авторы как Никольс в трудах 1908 г, Эшли в работе 1909 г, Форбс и Фри в работах 1912 г, Кларк и Ральстон в 1915-1916 г.г. изучали влияние на процесс седиментации таких параметров как концентрация твердых частиц и электролитов, степень флокуляции и температуры. Мишлер впервые показал экспериментально, что скорость осаждающихся шламов различна для разбавленных и концентрированных суспензий.

В то время как скорость осаждения разбавленных шламов, как правило, не зависит от глубины (высоты) аппарата для осаждения (сгустителя), скорости осаждения шламов с высокой плотностью возрастают по мере увеличения глубины сгустителя. Он вывел формулу, с помощью которой результаты лабораторных исследований могут быть использованы при моделировании и проектировании непрерывных сгустителей. На основе результатов работ 1915 г. Кларка и своих собственных экспериментов, Коэ и Клевенджер в 1916 г. признали, что осаждение гомогенной флокулирующей суспензии приводит к образованию че-

тырех зон осаждения: зона чистой воды, зона постоянной начальной концентрации, переходная зона и компрессионная зона. Коэ и Клевенджер утверждали, что пропускная способность по твердому или удельный расход твёрдых частиц имеет максимальное значение в сгустителе при определенном разбавлении. Коэ и Клевенджер независимо от Мишлера вывели аналогичное уравнение, которое с определенными коррекциями, продолжает быть самым надежным уравнением, используемым при проектировании сгустителя. Такие авторы как Эгольф и МакКабе, Вард и Каммермейер, Уорк и Кохлер, Каммермейер занимались описанием процесса осаждения суспензий, основываясь так или иначе на уравнении Стокса или эмпирическом моделировании процесса седиментации, но до 1940 г. никаких дальнейших важных вкладов по технологии сгущения не было сделано [2].

1.2.1 Сгуститель

Сгуститель – это стандартное устройство, которое не изменилось с момента изобретения сгустителя Дорра в 1905 г. Они стали больше и построены из различных материалов, таких как дерево, сталь, цемент и их система гребков была улучшена и модернизирована, но элементы остались теми же. Цилиндрический резервуар с питателем, желобом для перетока осветленной жидкости, гребками и нижним сбросом, все элементы общие для любого современного сгустителя. В небольших устройствах меньше 30 м в диаметре, цилиндрический резервуар стальной или деревянный, тогда как резервуары до 150 м в диаметре делаются из бетона. Дно сгустителя изготавливается из того же материала, что и резервуар и имеет конусное основание для улучшения удаления осадка. Питатель – это небольшой концентрический цилиндр, разработанный для тщательного перемешивания входящей пульпы с флокулянтom и в некоторых случаях для разбавления подачи и доставки ее равномерно в сгуститель. Многие сгустители имеют перегородки для выполнения этих задач. Гребные лопасти транспортируют осадок со дна резервуара к нижнему отверстию для сброса сгущенного слоя. Гребные лопасти, имеющие несколько опорных конструкций,

вращаются со скоростью примерно один оборот в час. Вторичный эффект гребных лопастей – это создание канала в осадке, через который вода может выходить в верхние слои, таким образом, увеличивая плотность пульпы нижнего продукта. Гребные лопасти могут иметь центральный двигатель или периферийную двигательную систему. Все модели сгустителей оснащены механизмом для подъема гребных лопастей на случай, если крутящий момент для перемещения осадка становится избыточным. Осветленный верхний слой перетекает через верх сгустителя в переточные желоба, слив происходит медленно, чтобы избежать увлечения мелких частиц (скорость потока составляет примерно $0.1 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м периметра).

1.3 Теория сгущения

Сгущение включает в себя два явления: процесс седиментации и процесс консолидации. Во время процесса седиментации частицы оседают в жидкости, сталкиваясь друг с другом под действием давления, сил трения и гравитации. При определенной концентрации частицы начинают касаться друг друга, преобразуя суспензию в структуру твердых частиц, называемую осадок. Теперь силы между частицами передаются непосредственно от частицы к частице. Если оседающие частицы, которые достигают дна сосуда и ложатся друг на друга, несжимаемы, например, стеклянные шарики, весь процесс завершается, но если они сжимаемыми, например, флокулы КШ, вес осадка сжимает хлопья, лежащие под ним, выталкивая воду из пор. Это явление извлечения воды путем сжатия называется консолидация.

Седиментация и консолидация обычно разделяются по высоте аппарата сгущения, имея характеристическую концентрацию. Концентрация, где осаждающиеся частицы или хлопья начинают касаться друг друга, называется критической концентрацией, также известной как «предел текучести» при сжатии или гелевой точкой.

1.3.1 Процесс динамического сгущения. Теория седиментации Кинча

Свойства твердого материала и жидкости, участвующих в сгущении – это свойства, описывающие седиментацию и консолидацию [2]:

- Концентрация твердого вещества согласно объемной фракции $\varphi(z, t)$;
- Плотность потока твердых частиц $f(z, t)$;
- Конвективная скорость пульпы $q(z, t)$;
- Сила взаимодействия твердое вещество-жидкость $m_d(z, t)$;
- Избыточное давление пор $p_e(z, t)$;
- Эффективное сжатие твердого вещества $\sigma_e(z, t)$.

Данные переменные для процесса динамического сгущения в областях, где переменные непрерывные, подчиняются следующим уравнениям [2]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0 \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0, q = U_s - (1 - \varphi)U_r \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial \sigma_e}{\partial z} = -\Delta \rho \varphi g + \frac{m_d}{1 - \varphi} \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial p_e}{\partial z} = -\frac{m_d}{1 - \varphi} \quad (1.10)$$

где: $f = U_s \varphi$ – функция плотности потока твердых частиц, $U_r = U_s - U_f$ – относительная скорость «твердое вещество – жидкость», m_d – динамическая сила взаимодействия «твердое вещество – жидкость» [2].

1.3.1.1 Периодический процесс седиментации

Седиментация может быть охарактеризована периодическим или непрерывным процессом. Периодическая седиментация обычно используется в лабораторных экспериментах. Взвесь вводится в мерный стакан с закрытым дном. Суспензии дают осесть под действием силы тяжести, и изменяющаяся высота (глубина) «осветленная жидкость – сгущенный осадок» записывается как функция времени (рисунок 1.3) [2].

В лабораторных исследованиях используется мерный цилиндр, который имитирует «непрерывный сгуститель» с питателем сверху и гребными лопастями внизу резервуара. Если пульпа твердой фракции φ_0 вводится в цилиндр $V = A \times L$, где S – поперечное сечение цилиндра и L высота суспензии (рабочая высота мерного цилиндра), общая твердая масса M и объем твердых частиц на единицу площади W в цилиндре [2]:

$$M = \rho_s A L \varphi_0 \text{ и } W = \left(\frac{V}{A}\right) \varphi_0 = L \varphi_0 \quad (1.11)$$

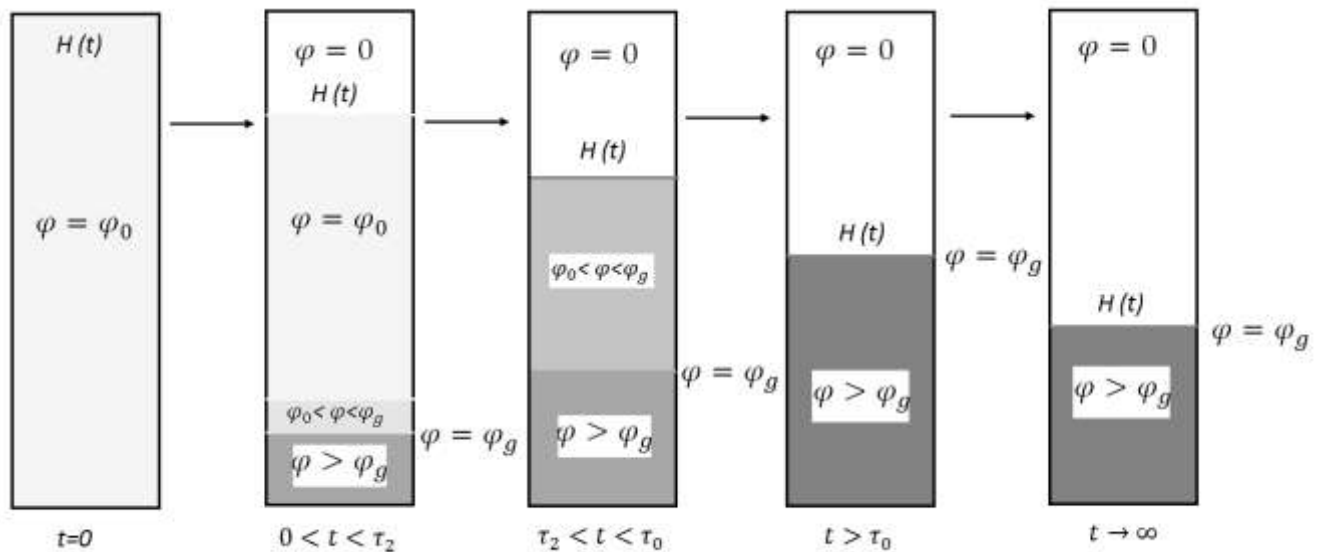


Рисунок 1.3 – Процесс периодической седиментации

Существуют некоторые допущения для периодического процесса седиментации [2]:

1. Отсутствует входящий и выходящий поток суспензии из осаждающего аппарата (сгустителя), поэтому средняя скорость объема $q = 0$;
2. Суспензия имеет начальную постоянную концентрацию φ_0 ;
3. Окончательная концентрация осадения φ_∞ .

1.3.1.2 Непрерывный процесс седиментации

На рисунке 1.4 показан непрерывный сгуститель с питателем и гребными лопастями.



Рисунок 1.4 – Непрерывный сгуститель

Было установлено, что в непрерывном сгустителе существуют пять зон (рисунок 1.5):

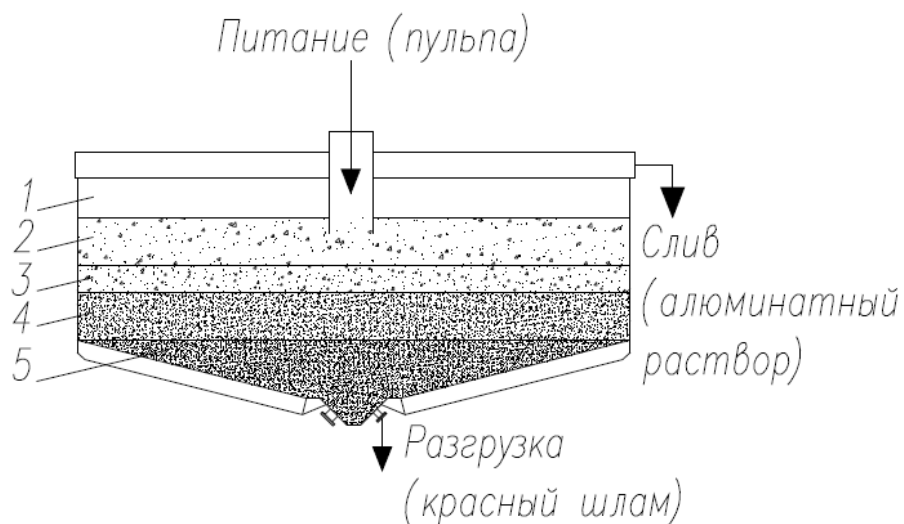


Рисунок 1.5 – Непрерывный сгуститель

- Зона 1 соответствует чистой воде, которая расположена в районе над и вне питающего колодца или зона верхнего слива, из которой непрерывно откачивается/перетекает осветленный раствор;
- Зона 2 находится под зоной чистой воды, зона свободного осаждения частиц, где отсутствует взаимодействие между частицами и скорость осаждения описывается законом Стокса;
- Зона 3 – зона стесненного осаждения, где взаимодействие между частицами описывается эмпирическим выражением Ричардсона и Заки;

- Зона 4 – зона постоянной и конечной концентрации, сжатия и уплотнения осадка, где происходит вытеснение алюминатного раствора из твердой фазы под действием давления вышележащих слоев и действия гребков;
- Зона 5 – зона действия гребков/зона уплотненной твердой фазы.

Существуют некоторые допущения для непрерывного процесса седиментации [2]:

1. Скорость сгущенного потока суспензии из идеального сгустителя:

$$q(t) = \frac{Q_D(t)}{s};$$

2. Суспензия имеет начальную концентрацию распределения: $\varphi_1(z)$;

3. Твердые частицы никогда не входят в зону 1: $0 \leq z \leq L$, где L – основание питающего колодца.

1.3.2 Факторы, влияющие на процесс сгущения

Основными факторами, влияющими на процесс сгущения, являются крупность частиц шлама, процессы коагуляции и флокуляции, минералогия шлама, степень разбавления, плотность и форма частиц, плотность и вязкость жидкой фазы, температура пульпы, РН пульпы, концентрация твердой фракции в исходной пульпе.

Крупность частиц шлама (зернистость) зависит от условий размола боксита и его поведения при выщелачивании. Бемит – диаспоровые бокситы прочные, тяжело выщелачиваемые, после помола будут содержать много мелких частиц размером от 1 до 10 мкм. Отсюда следует, что необходимо применение коагулянтов и флокулянтов.

Использование различных флокулянтов и коагулянтов существенно увеличивает производительность сгустителей и соответственно производительность участка сгущения и промывки КШ. Коагулянты улучшают агрегацию шламов, но их применение увеличивает производительность сгущения незначительно.

В настоящее время практически все предприятия перешли на флокулянты. Например, на УАЗе (Уральский алюминиевый завод, Россия) применяют флокулянты фирмы Sytec серии НХ-3000 на ветке сгущения, при этом скорость слива увеличивается в 2-3 раза.

Говоря о минералогии шлама, нужно отметить, что все составляющие шлама по отношению к воде делятся на 2 группы: гидрофобные и гидрофильные. Составляющие КШ в основном гидрофильные минералы, но сгустители лучше работают с гидрофобными составляющими. При повышении температуры выщелачивания до 280 – 300 °С практически все составляющие шлама переходят в гидрофобные, то есть быстро осаждаются. Повышение температуры также снижает вязкость пульпы.

1.3.3 Существующее оборудование для обезвоживания металлургических пульп

В промышленности применяются сгустители различных конструкций и принципов действия типа.

Различают сгустители гравитационного, инерционного и комбинированного типов.

Разделение аппаратов сгущения по конструктивным признакам представлено на рисунке 1.6.

По принципу работы сгустители делятся на аппараты непрерывного и периодического действия. По характеру осаждения – на сгущение в объеме и тонком слое.

Особый интерес для процесса сгущения металлургических пульп представляют сгустители четырех типов: 1 - традиционные сгустители (рисунок 1.7), 2 - высокопроизводительные сгустители (рисунок 1.8), 3 – сгустители с высокой степенью сжатия сгустители (рисунок 1.9) и 4 - пастовые сгустители (рисунок 1.10).

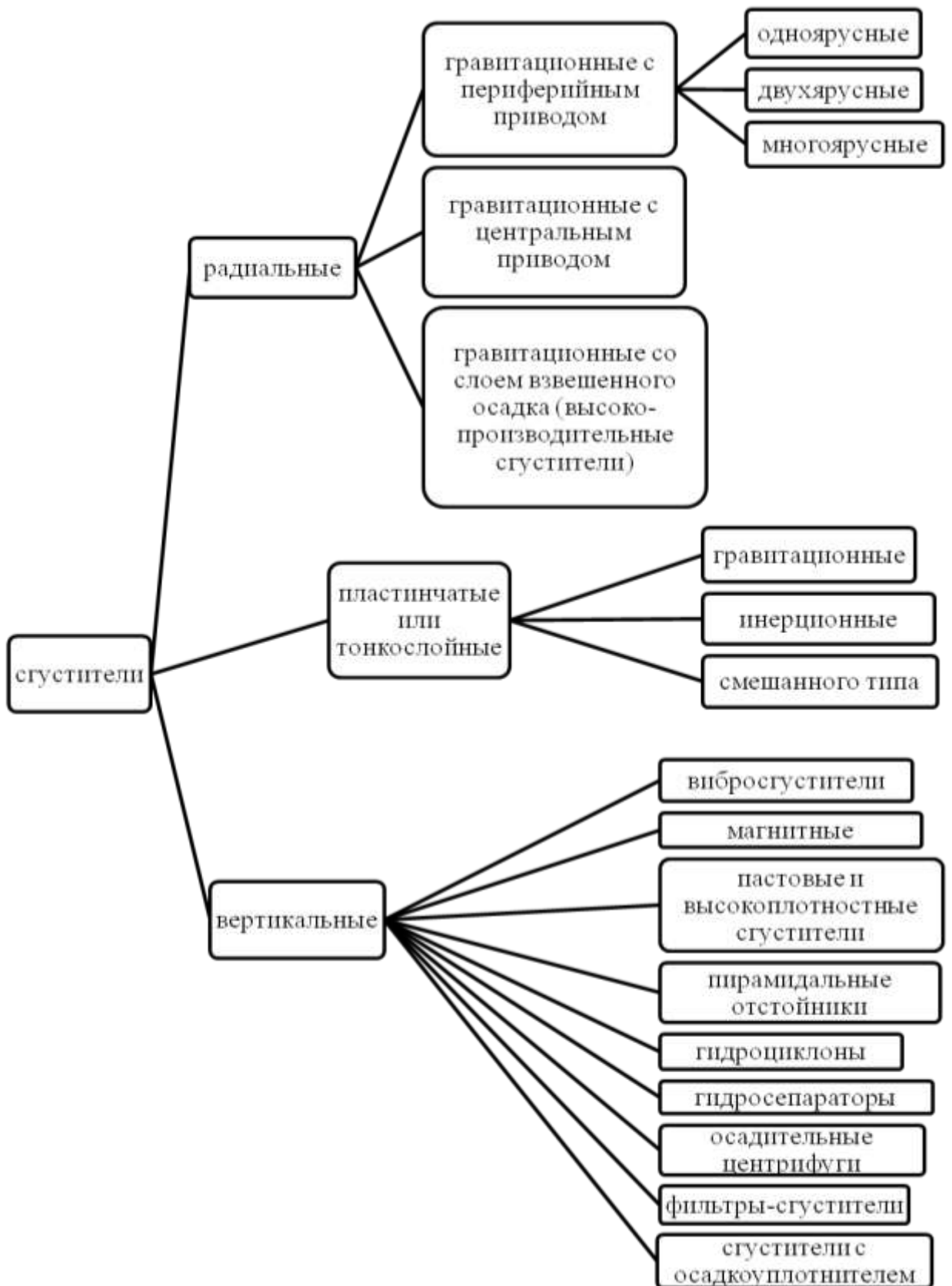


Рисунок 1.6 – Классификация сгустителей, применяемых для разделения технологических пульп

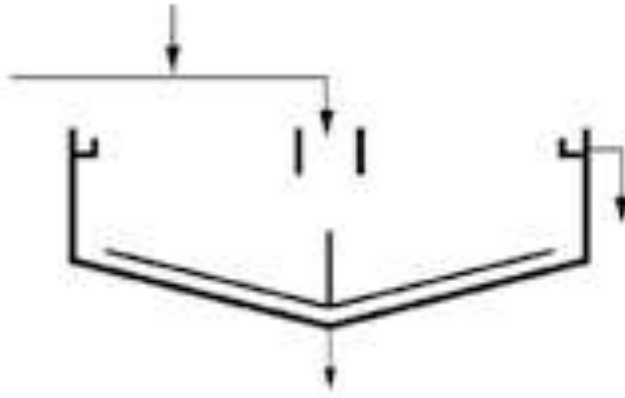


Рисунок 1.7 – Радиальный одноярусный гравитационный сгуститель [18]

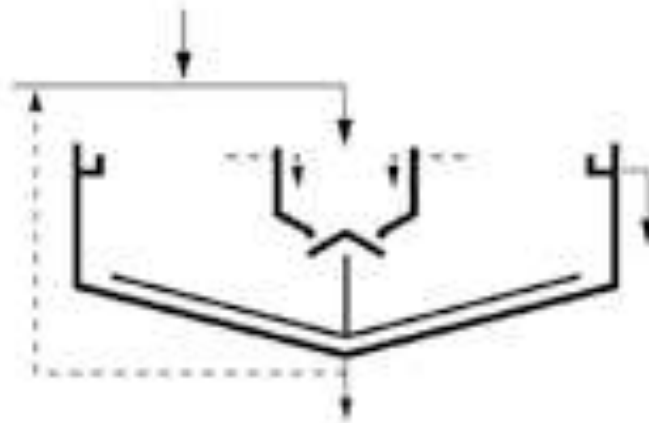


Рисунок 1.8 – Высокопроизводительный сгуститель [18]

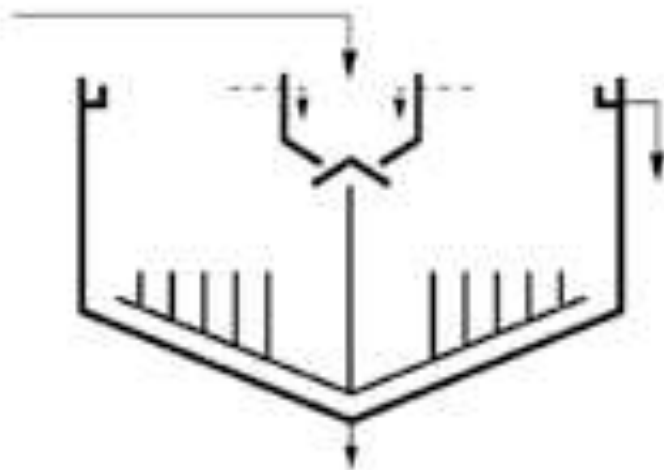


Рисунок 1.9 – Сгуститель с высокой степенью сжатия [18]

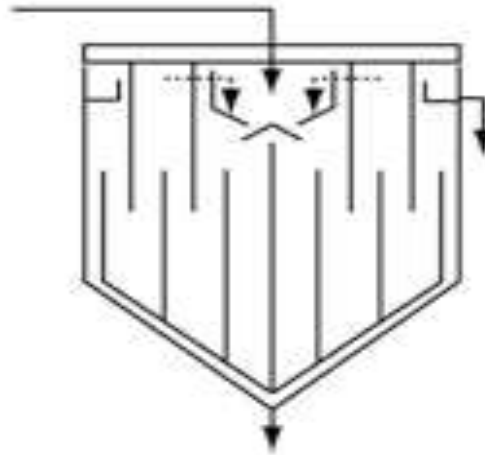


Рисунок 1.10 – Пастовый сгуститель [18]

1 - В традиционных сгустителях и осветлителях питатель (питающий колодец) расположен в верхней части резервуара. Когда суспензия подается в резервуар, она разбавляется до так называемой концентрации коньюгата входящим потоком воды. Разбавляемая суспензия осаждается при постоянной скорости для формирования осадка внизу резервуара. Флокулянт может не применяться, сгуститель не чувствителен к кратковременным изменениям процесса.

2 – Высокопроизводительные, высокоскоростные сгустители были внедрены в начале 1960-х г.г. различными производителями (Eimco NICAP, Enviroclear High Capacity CT) в горную промышленность. Данные сгустители имеют более длинные питатели, которые доставляют сырье непосредственно в осадок. Когда сырье смешивается с высокоплотным осадком, оно увеличивается в концентрации, формируя суспензию с концентрацией равной или больше критической концентрации. Поэтому в данном типе сгустителя практически отсутствует зона осаждения. Часто нижний сгущенный продукт высокопроизводительных сгустителей рециклом смешивается с входящим потоком сырья в сгуститель, что предположительно увеличивает мощность оборудования, улучшает образование флокул и захват частиц более мелкой фракции частицами более крупной фракции при осаждении. Сгустители данного типа характеризуются более чистым верхним сливом, чем сгустители традиционного типа [18]. Термин высокопроизводительные сгустители используется для малых (до

среднего размера) сгустителей и для больших традиционных сгустителей, обрабатывающих очень большой тоннаж благодаря оптимизации дозировки флокулянта и концентрации питающей сгуститель суспензии.

3,4 - Сгустители с высокой степенью сжатия и пастовые сгустители аналогичны традиционным или высокопроизводительным сгустителям, но с большим углом наклона конусной части сгустителя и намного более высокими цилиндрическими резервуарами. Дополнительная высота производит большее давления на осадок на дне резервуара и, следовательно, увеличивает плотность нижнего продукта. В обоих типах сгустителей используются гребенчатые уплотнители для консолидации осадка. Сгустители данного типа характеризуются высокой устойчивостью граблин к перегрузкам, увеличенной зоной сжатия осадка. Единственное отличие между ними состоит в том, что пастовые сгустители намного выше и тоньше, по сравнению со сгустителями с высокой степенью сжатия [18].

1.4 Системы управления процессом сгущения красного шлама

Сведения по СУ процессами глиноземного производства содержатся в [19, 20], схема управления отдельными параметрами процесса фирмы Outotec представлена в [9]. Функции существующих АСУ ТП сгущения заключаются в стабилизации параметров первичных технологических контуров. Процесс сгущения является типичным примером системы со множеством нелинейно взаимосвязанных входных и выходных параметров, с различными ограничениями на управляющие воздействия [21]. Как было отмечено ранее, главной задачей при управлении сгустителем в процессе сгущения КШ должно быть наименьшее содержание твёрдой фазы в сливе. Решением может быть использование каскадного принципа регулирования. Сгуститель как объект управления довольно сложный. Отметим основные входные и выходные параметры процесса сгущения (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Основные возможные входные и выходные параметры процесса

Контролируемые параметры	Управляющие параметры	Измеряемые параметры	Возмущающие параметры
Плотность сгущенного продукта	Скорость откачки сгущенного продукта	Плотность сгущенного продукта	Распределение частиц по размерам в питании
Чистота алюминатного раствора (верхнего слива)	Скорость подачи флокулянта	Мутность алюминатного раствора (верхнего слива)	Распределение частиц по размерам после флокуляции
Момент вращения граблин	Тип флокулянта	Момент вращения граблин	Концентрация твердой фракции в питании
Высота граблин	Степень разбавления флокулянта	Скорость подачи флокулянта	Скорость подачи питания
Уровень постели	Скорость вращения граблин	Уровень постели	Уровень постели
Содержание твердой фазы в сгущенном продукте		Профиль концентрации твердой фазы	Профиль концентрации твердой фазы
Размер образовавшихся флокул		Скорость осаждения	Скорость осаждения
Скорость осаждения		Распределение частиц по размерам в питании	Активность флокулянта
		Распределение частиц по размерам после флокуляции	Гидростатическое давление
		Концентрация твердого в питании	Температура Питающей пульпы

Продолжение таблицы 1.1– Основные возможные входные и выходные параметры процесса

Контролируемые параметры	Управляющие параметры	Измеряемые параметры	Возмущающие параметры
		Скорость подачи питания	Активность флокулянта
		Скорость откачки сгущенного продукта	рН пульпы
		Степень разбавления флокулянта	
		Активность флокулянта	
		Гидростатическое давление	
		Температура питающей пульпы	
		рН пульпы	

Особенностью процесса сгущения является значительное количество выходных показателей, часть из которых – расходы и плотности разгрузки и слива – сильно коррелированы между собой. Точное измерение всех величин затруднительно. Например, плотность слива измеряют неточно в связи с низкой плотностью, измерение высоты сгущенного слоя затруднено из-за отсутствия четкой границы между зонами. Все это приводит к различным, порой упрощенным вариантам управления сгустителями [22].

Основные контуры управления сгустителем, применяемые на предприятиях глиноземного производства в настоящее время [22]:

Одним из простых фундаментальных контуров является регулирование массы постели путем изменения скорости вращения насосов сгущенного продукта. В данной СУ значение датчика давления массы постели используется для настройки скорости вращения насоса сгущенного продукта, рисунок 1.11. Это простейший контур управления сгустителем. Но применять для стабилизации процесса сгущения массу постели целесообразно в каскадном управлении,

т.к. СКО плотности от задания сгущенного продукта может быть выше заданного значения [22].

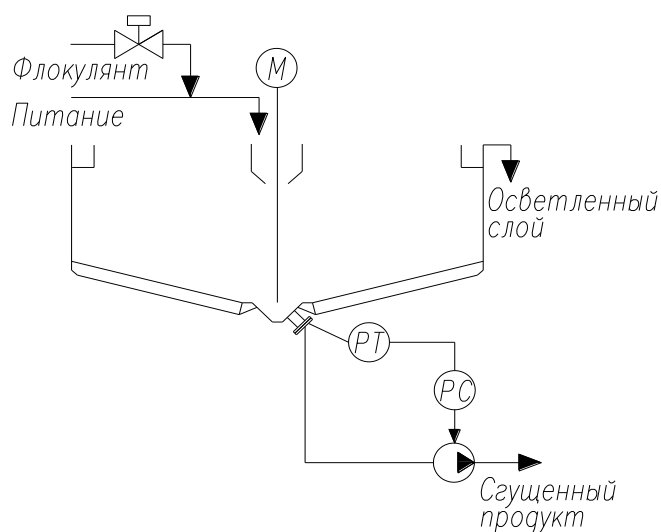


Рисунок 1.11 – Контур управления массой постели с помощью регулирования скорости насоса сгущенного продукта

Стабилизировать плотность сгущенного продукта можно, используя плотность сгущенного продукта в каскадном управлении с массой постели, где плотность - внешний контур, масса постели – внутренний (рисунок 1.12) [22].

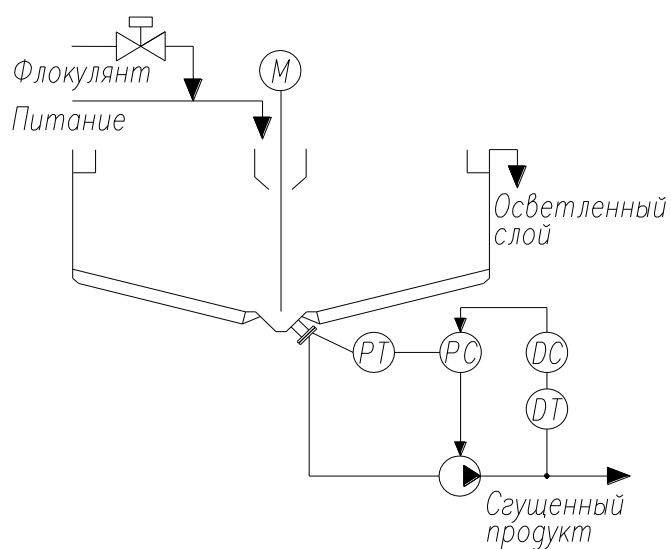


Рисунок 1.12 – Каскадная система управления (плотность - внешний контур, масса постели – внутренний)

Главным недостатком описанных выше методов стабилизации является отсутствие контроля за дозированием реагентов. Процесс флокуляции играет важную роль в процессе сгущения в современном производстве. Процесс флокуляции контролируется изменением скорости вращения насосов флокулянта. На многих предприятиях в настоящее время используют «ручное» управление подачей реагентов. Этот метод может быть эффективным, если объемный расход питающего потока очень мал и постоянен, а производство небольшое. Тогда уместно осуществлять ввод вручную заданного значения дозы флокулянта. В остальных же случаях подобный метод управления расходом флокулянта не целесообразен [22].

Следующая рассматриваемая СУ построена на двух простых основных контурах. Процесс флокуляции управляется изменением скорости подачи флокулянта, контролируется с помощью датчика уровня постели (рисунок 1.13).

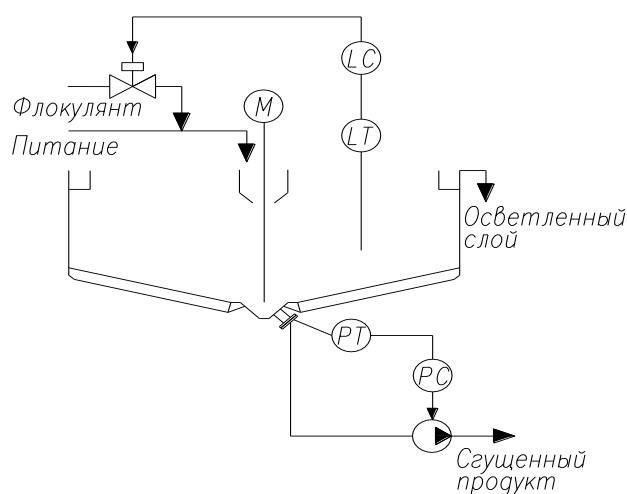


Рисунок 1.13 – Система управления процессом флокуляции с помощью датчика уровня постели

Таким образом, устанавливается оптимальный расход флокулянта в зависимости от производительности по твердому. Масса постели регулируется путем изменения скорости насосов сгущенного продукта. Управление расходом флокулянта и скоростью разгрузки сгущенного продукта стабилизирует про-

цесс сгущения и обеспечивает постоянную плотность сгущенного продукта. Недостатком является то, что нет стабильного управления запасами твердого в сгустителе [22].

В следующей СУ одним из контуров регулирования является управление дозированием флокулянта пропорционально расходу питающего потока в сгуститель (компенсация возмущения по расходу питающего потока) (рисунок 1.14). При наличии соответствующих средств измерения можно компенсировать и другие возмущения (например, управление дозированием флокулянта в зависимости от качественных характеристик питающего потока, таких как размер частиц или соотношение ж:т в питающем потоке) [22].

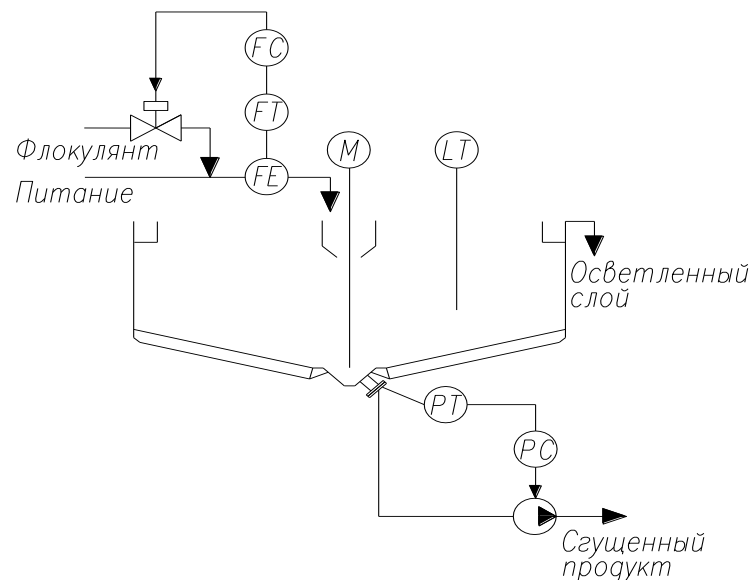


Рисунок 1.14 – Управление по прямой связи. Компенсация возмущения по расходу питающего потока

СУ процессом сгущения может быть представлена комбинированным управлением (рисунок 1.15). Сигнал на исполнительный орган дозатора флокулянта будет являться суммой сигналов, поступающих по прямой связи от датчика расхода питающего потока в сгуститель и по обратной связи (ОС) от датчика уровня постели [22].

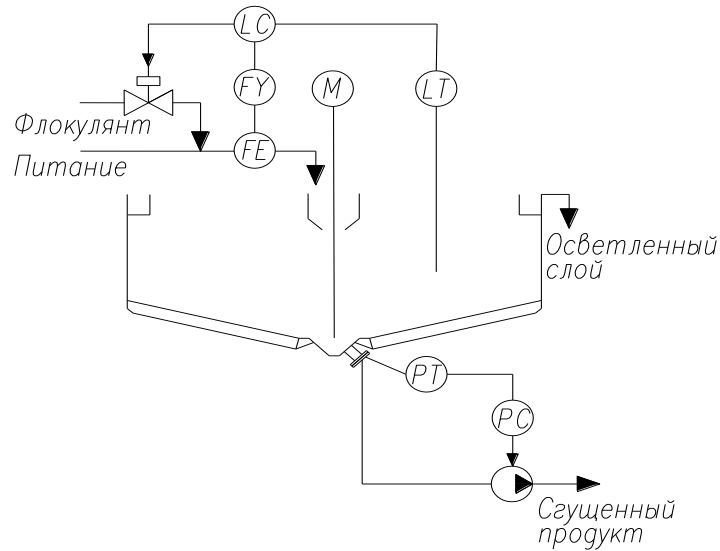


Рисунок 1.15 – Комбинированная система управления

Степень флокуляции измеряется прибором, который носит название кларометр [23]. Данные с кларометра могут быть использованы в комбинированном управлении (рисунок 1.16). Сигнал на исполнительный орган дозатора флокулянта будет являться суммой сигналов, поступающих по прямой связи от датчика расхода питающего потока в сгуститель и по ОС от кларометра [22].

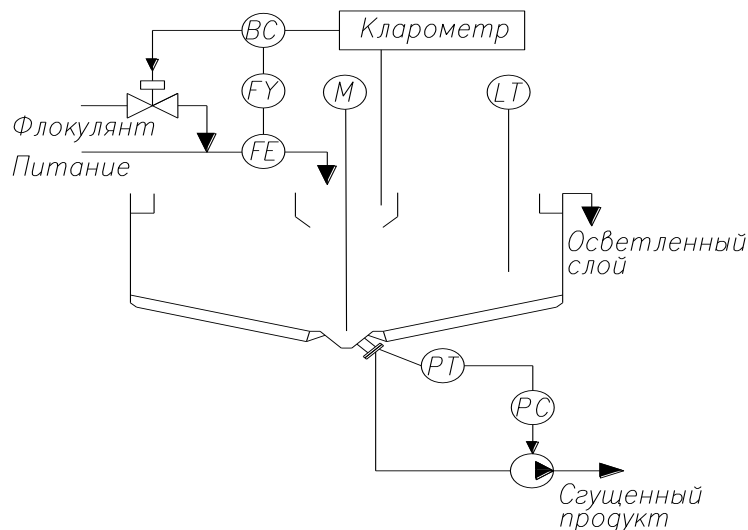


Рисунок 1.16 – Комбинированная система управления, где В – степень флокуляции

Таким образом, основными параметрами для стабилизации работы сгустителя являются уровень постели, на который влияет степень флокуляции, и масса постели, которая влияет на плотность сгущенного продукта [22].

Описанные СУ для процесса сгущения с различными вариантами контуров регулирования имеют свои плюсы и минусы. Каскадная СУ, например, уменьшает время регулирования, снижает колебательность переходных процессов, но многосвязность параметров ОУ создает дополнительные трудности для управления им. Компанией Outotec были проведены исследования и выяснено, что для нескольких последовательно установленных сгустителей, таких как в цикле противоточной декантации, принцип основного контроля остается такой же, как и для одного сгустителя. Не смотря на это, взаимосвязь контуров управления по цепочке сгустителей приводит к увеличению нарушений в массе постели [22].

Масса постели хорошо контролируется в сгустителе первого цикла противоточной декантации, по цепочке сгустителей вариации возрастают, что приводит к большим нарушениям в массе постели. К моменту, когда они достигают, например, пятого сгустителя цикла, контроль массы постели испытывает неприемлемые колебания, влияющие на рабочие параметры, такие как плотность сгущенного продукта и уровень постели [22].

Подробный анализ существующих СУ процессом сгущения был проделан в работе [24]. Среди СУ, используемых на промышленных объектах, можно выделить:

- Одноконтурное управление:
 - Управление с ОС;
 - Каскадное управление;
 - Управление по возмущению;
 - Регулирование соотношений;
 - Комбинированная схема управления по ОС с регулированием соотношений;

- Многоконтурное управление:
 - Разведение контуров;
- Управление по эталонной модели:
 - Компенсатор временных запаздываний (предиктор Смитта);
- Управление на основе прогнозирующей модели.

Основные недостатки и преимущества каждой из систем представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Краткое описание принципов управления процессом сгущения

Тип управления	Преимущества	Недостатки
Управление с ОС	<ul style="list-style-type: none"> • Просто и удобно; • Простота реализации; • Не требуется модель ОУ; • Эффективно для большинства производственных технологических контуров; 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая эффективность при наличии взаимосвязанных переменных; • Не эффективно для процессов со сложной динамикой процесса; • Низкая эффективность при наличии возмущений в регулируемых переменных;
Каскадное управление	<ul style="list-style-type: none"> • Простота реализации; • Повышает качество управления регулируемой переменной при воздействии возмущений на нее; • Не требуется модель ОУ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая эффективность при наличии взаимосвязанных переменных; • Не эффективно для процессов с большим транспортным запаздыванием;
Управление по возмущению	<ul style="list-style-type: none"> • Позволяют полностью компенсировать возмущающее воздействие; • Не может нарушить устойчивость СУ; 	<ul style="list-style-type: none"> • Устраняет влияние основных возмущений; • Точность регулирования и компенсация снижаются при изменении характеристик ОУ;

Продолжение таблицы 1.2 – Краткое описание принципов управления процессом сгущения

Тип управления	Преимущества	Недостатки
Комбинированная схема управления по ОС с регулированием соотношений	<ul style="list-style-type: none"> • регулятор соотношений заботится о больших и часто измеряемых возмущениях, а регулятор с ОС компенсирует любые ошибки, которые могут возникнуть в результате несоответствия между моделью и процессом или других возмущений; 	<ul style="list-style-type: none"> • Не эффективно для процессов с транспортным запаздыванием;
Управление по прямой и ОС	<ul style="list-style-type: none"> • Компенсирует влияние измеренных возмущений; • Действие ОС компенсирует несоответствие модели и неизмеренных возмущений; • Подходит для процессов с медленной динамикой; 	<ul style="list-style-type: none"> • Не эффективно для процессов с транспортным запаздыванием; • Низкая эффективность при наличии взаимосвязанных переменных;
Разведение контуров	<ul style="list-style-type: none"> • Простота применения; • Взаимодействие уменьшается за счет соответствующего подбора пар; • Рассматривается как тип регуляторов с прямой связью для минимизации взаимодействий в системе; 	<p>Ошибки в моделях влияют на точность разводки, на стабильность многокомпонентной системы. Для сгустителя, разводка не может быть реализована, т.к. присутствует временная задержка. Аппроксимация времени задержки изменяет динамику поведения системы так, что система больше</p>

Продолжение таблицы 1.2 – Краткое описание принципов управления процессом сгущения

Тип управления	Преимущества	Недостатки
		не сможет достичь задаваемых значений;
Разведение контуров	<ul style="list-style-type: none"> • Простота применения; • Взаимодействие уменьшается за счет соответствующего подбора пар; • Рассматривается как тип регуляторов с прямой связью для минимизации взаимодействий в системе; 	<ul style="list-style-type: none"> • Аппроксимация времени задержки изменяет динамику поведения системы так, что система больше не сможет достичь задаваемых значений; • Проблема взаимодействия уменьшается, но не устраняется; • Не эффективно для процессов с временными задержками;
Компенсатор временных запаздываний (предиктор Смитта)	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая эффективность для процессов с постоянным транспортным запаздыванием; 	<ul style="list-style-type: none"> • Неточность модели влияет на эффективность; • Не эффективно для процессов, где временные задержки изменяемые; • Низкая эффективность за счет взаимодействия переменных;
Управление на основе прогнозирующей модели	<ul style="list-style-type: none"> • Интеграция производственных задач в пределах схемы управления; • Минимизация взаимодействия; • Высокая эффективность для процессов с временными задержками; 	<ul style="list-style-type: none"> • Управление на основе прогнозирующей модели;

Продолжение таблицы 1.2 – Краткое описание принципов управления процессом сгущения

Тип управления	Преимущества	Недостатки
	<ul style="list-style-type: none"> • Явное включение ограничений процесса; • Обработка данных об известных и неизвестных нарушениях; 	
Управление с использованием базы знаний	<ul style="list-style-type: none"> • Возможность включения доступных знаний о процессах; • Устранение проблемы взаимодействия. 	<ul style="list-style-type: none"> • Низкая эффективность при неизвестных условиях эксплуатации; • Может использоваться только для конкретного исследуемого ОУ; • Средства разработки не всегда доступны.

Таким образом, будущее процесса сгущения в разработке высокоуровневой системы контроля и управления. Оптимальным выходом в данной ситуации является управление на основе прогнозирующей модели. Модель, отслеживая значение возмущения, прогнозирует поведение целевой функции и, зная коэффициент усиления и период отклика, регулирует управляющий параметр таким образом, чтобы компенсировать возмущение и не допустить выхода целевого показателя за требуемые пределы. Естественно главным элементом при данном типе управления является модель, если она адекватна, точно описывает процесс, то тогда можно обеспечить надлежащее качество целевого параметра.

1.5 Управление параллельными сгустителями

Передел сгущения и промывки КШ представлен параллельно работающими сгустителями и промывателями (часть из которых находится в работе). Промывка шлама осуществляется в несколько ступеней, питание аппаратов сгущения осуществляется через РК.

Известные способы управления группой параллельно работающих сгустителей представлены в работах [25, 26, 27]. Существующие запатентованные методики управления распределением питающего потока между параллельными сгустителями являются полуавтоматическими и основаны на известных контурах управления.

Создание алгоритма распределения потока между параллельно работающими агрегатами – одна из главных задач работы. Алгоритмов применительно к данному процессу и сгустителям по распределению потоков нет.

Синтез САУ на базе управляющего устройства (УУ) с прогнозирующей моделью и блоком оптимизации, который позволит распределять питающий поток между параллельными аппаратами, является актуальной задачей глиноземного производства.

Решением данной задачи может являться УУ на основе алгоритма клонального отбора в качестве надстройки над верхним уровнем – SCADA - системой в иерархической СУ.

Подробное обоснование необходимости управления распределением питающего потока для параллельно работающих сгустителей/промывателей и синтез СУ на основе прогнозирующей модели и блока оптимизации на базе алгоритма клонального отбора приведены в Главе 4. Алгоритм клонального отбора основан на особенностях иммунных систем (ИС). Теоретическим сведениям об ИИС посвящен следующий раздел Главы 1.

1.6 Теоретические сведения об искусственной иммунной системе

Решение задач оптимизации является одной из основных сфер применения различных эвристических алгоритмов, вдохновленных как живой, так и неживой природой. ИИС – адаптивная вычислительная система, использующая модели, принципы, механизмы и функции, описанные в теоретической иммунологии, которые применяются для решения прикладных задач [28].

Разработкой интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе ИИС, применением алгоритмов на основе ИИС для ре-

шения задач многомерной оптимизации занимаются как отечественные, так и зарубежные ученые такие как: Аксенов В.В., Самигулина Г.А., Брюховецкий А.А., Скатков А.В., Garrett S.M., Hunt J.E., Cooke D.E., Knight T., Timmis J. Aine, Dasgupta D., Yua S., Nino F., Puteh M., Hamdan A.R., Omar K., Bakar A.A. Flexible, Castro P.A.D., von Zuben F.J. Mobais и др. [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Молекула, распознаваемая адаптивной ИС, называется антигеном (АГ). Когда животное подвергается воздействию антигена, некоторые субпопуляции его клеток костномозгового происхождения (В-лимфоциты) отвечают производством антител (АТ). Антитела – это молекулы, первично прикрепленные к поверхности В-клеток, цель которых – распознавать АГ и связываться с ними. Каждая В-клетка секретирует отдельный тип АТ, являющийся относительно определенным для данного АГ. Привязываясь к таким АТ и по второму сигналу вспомогательных клеток, например, клетки Т-лимфоциты, АГ стимулирует В-клетку к разрастанию (делению) и созреванию в секретирующие АТ терминальные (неделимые) клетки, которые называются плазматическими клетками. В процессе деления клеток (митоза) образуется клон, то есть одна или ряд клеток, являющихся потомством отдельной клетки [39].

Помимо разрастания и дифференциации в плазматические клетки, В-клетки могут дифференцироваться в долгоживущие В-клетки памяти. Клетки памяти циркулируют в крови, лимфе и тканях, а при воздействии второго антигенного раздражителя начинают дифференцироваться в плазматические клетки, способные продуцировать высокоаффинные антитела, предварительно отобранные для конкретного антигена, который простимулировал первичный ответ. На рисунке 1.17 изображен принцип работы иммунной системы [39].

Основные особенности теории ИИС, исследуемой в данной работе:

- 1 разрастание и дифференциация при стимуляции клеток антигенами;

2 формирование новых случайных генетических изменений, выражаемых впоследствии в многообразии структур антител, в виде ускоренной соматической мутации (процесс называется созреванием аффинности);

3 оценка вновь дифференцированных лимфоцитов, несущих низкоаффинные антигенные рецепторы.

1.6.1 Обучение с подкреплением и иммунная память

Обучение в ИС включает повышение относительного размера популяции и аффинность лимфоцитов, подтвердивших свою значимость благодаря распознаванию указанного АГ. Используя теорию клональной селекции для решения практических проблем, ставится цель не отстоять как можно больше вариантов решения, а поддержать небольшое число самых лучших из них. Клон создается временно, а потомство с низкой аффинностью выбрасывается. Целью является решение задачи при использовании минимального количества ресурсов. Таким образом, находятся высокоэффективные и при этом экономные решения [39].

При обычном ходе эволюции ИС предполагается, что организм за всю свою жизнь встретится с указанным АГ несколько раз. Первичное воздействие АГ, стимулирующее адаптивный иммунный ответ, активирует небольшое количество низкоаффинных В-клеток, каждая из которых продуцирует тип АГ с различной аффинностью. Эффективность иммунного ответа на вторичную встречу существенно увеличивается за счет присутствия клеток памяти, связанных с первым заражением, которые сразу способны продуцировать высокоаффинные антитела при последующих встречах. Чтобы не начинать каждый раз с нуля, данная стратегия гарантирует, что и скорость, и точность иммунного ответа постепенно повышается после каждого заражения. Это характерная схема стратегии обучения с подкреплением [40], когда взаимодействие со средой постоянно совершенствует способность системы осуществлять поставленную задачу [39].

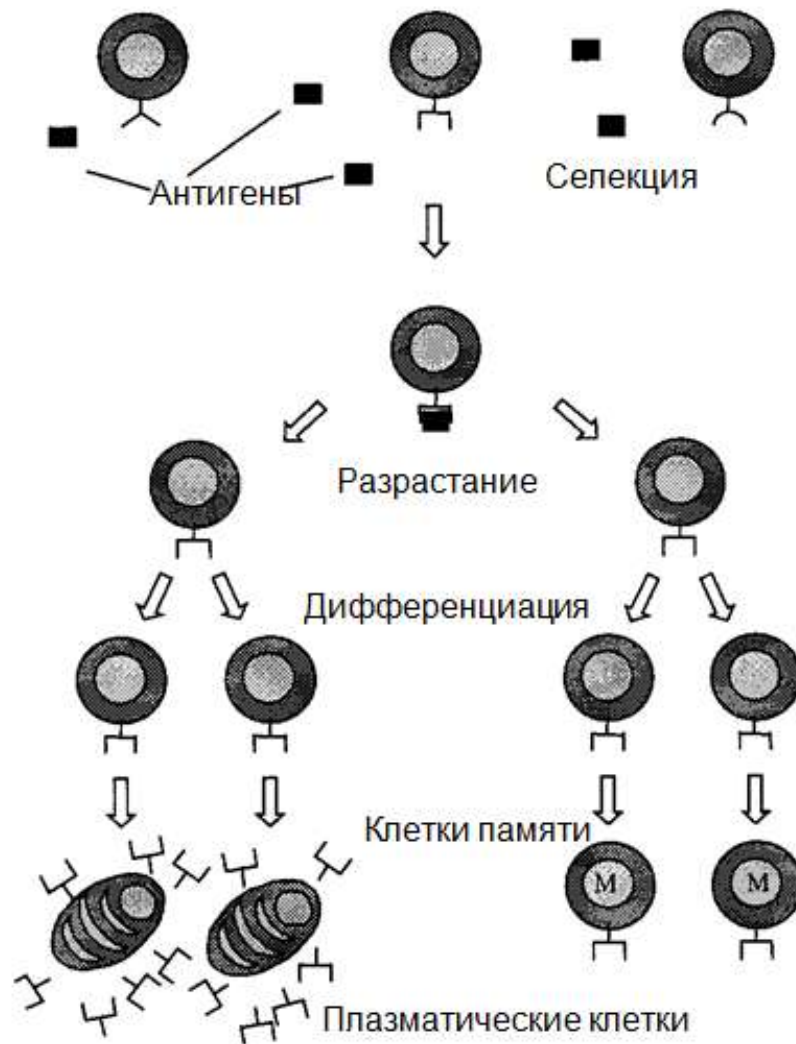


Рисунок 1.17 – Принцип работы иммунной системы [39]

Одной из важных характеристик иммунной памяти является ее ассоциативность: В-клетки, адаптированные к определенному типу антигена АГ1, осуществляют более быстрый и более эффективный вторичный ответ не только на антиген АГ1, но и на структурно связанный антиген АГ'1. Данное явление называется иммунологической перекрестной реакцией, или перекрестно-реагирующим ответом [41, 42, 43, 44, 45]. Эта ассоциативная память содержится в процессе вакцинации и называется способностью к генерализации, или просто генерализацией в других искусственных (вычислительных) интеллектуальных сферах, таких как нейронные сети [46].

Важно отметить, что с учетом технической перспективы клетки с повышенной аффинностью должны как-то сохраняться в качестве высокоэффектив-

ных вариантов решений и заменяться только вариантами с улучшенными качествами на основании статистических подтверждений. Вот почему в первой версии нашей модели мы сохраняем определенное количество конкретных клеток памяти как часть всего спектра [39].

Таким образом, иммунное обучение и иммунная память приобретаются путем [47]:

- 1 неоднократного воздействия АГ;
- 2 созревания аффинности молекул рецепторов;
- 3 слабого хронического заражения;
- 4 перекрестной реактивностью.

1.6.2 Созревание аффинности

В случае Т-зависимого клеточного иммунного ответа спектр активированных антигеном В-клеток в основном отличается двумя механизмами: 1) сверхмутацией и 2) редактированием рецепторов [48, 49, 50, 51].

Антитела, присутствующие в ответе памяти, обладают, в среднем, более высокой аффинностью, чем те, которые участвуют в предыдущем первичном ответе. Это явление, которое сводится к Т-зависимым клеточным ответам, относится к созреванию иммунного ответа. Для такого созревания требуется, чтобы антигенсвязывающие участки молекул антител структурно отличались от участков, присутствующих при первичном ответе [39].

Случайные изменения происходят в генах, ответственных за взаимодействие «антиген-антитело», а одно такое изменение периодически приводит к увеличению аффинности антитела. Затем эти варианты с повышенной аффинностью отбираются для введения в фонд клеток памяти. Не только спектр разделяется из-за механизма сверхмутации, но также должны существовать и такие механизмы, чтобы редкие В-клетки с высокоаффинными мутирующими рецепторами отбирались для доминирования в ответе. Клетки же с низкоаффинными или аутореактивными рецепторами должны эффективно исключать-

ся, становятся апатичными (бездеятельными), или редактироваться [48, 49, 50].

1.6.3 Иммунная оптимизация

Метод иммунной оптимизации сводится к решению задачи глобальной условной минимизации/максимизации скалярной целевой функции $f(x)$ вещественных переменных x в области допустимых значений.

Все методы иммунной оптимизации работают с популяцией клеток [52]. Обзор основных методов иммунной оптимизации, а также возможность создания гибридных методов глобальной оптимизации на основе ИИС представлен в работе [52].

Основные понятия ИИС, используемые далее в работе в Главе 4:

- клетка, антитело — решение в области допустимых значений;
- аффинность — величина, обозначающая полезность клетки и равная соответствующему значению целевой функции, взятому с противоположным знаком;
- популяция — множество клеток;
- клон — клетка, образованная из другой клетки путем ее полного копирования;
- мутация — случайное изменение компонентов вектора x .

1.7 Выводы по первой главе

1 Приведено подробное описание технологии производства глинозема по способу Байера и передела сгущения и промывки КШ;

2 Детально описаны теоретические основы процесса сгущения, периодический и непрерывный процесс седиментации;

3 На основании проведённого литературного обзора выявлены основные влияющие факторы на кинетику процессов сгущения КШ;

4 Сделан обзор существующего оборудования для обезвоживания металлургических пульп, подробно рассмотрены сгустители четырех типов: тра-

диционные сгустители, высокопроизводительные сгустители, сгустители с высокой степенью сжатия и пастовые сгустители;

5 Проанализированы существующие СУ процессом сгущения, выявлены преимущества и недостатки каждой из систем, определен метод управления на основе прогнозирующей модели;

6 Проведен литературный обзор существующих запатентованных методик управления распределением питающего потока между параллельными сгустителями, которые в большинстве своем являются полуавтоматическими и основаны на известных контурах управления, описанных в данной главе работы;

7 Сформулирована и обоснована задача синтеза САУ на базе управляющего устройства с прогнозирующей моделью ОУ и блоком оптимизации на основе алгоритма клонального отбора, который позволит распределять питающий поток между параллельными аппаратами.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДУЕМОГО ОБРАЗЦА КРАСНОГО ШЛАМА

2.1 Объект управления

Радиальный одноярусный сгуститель диаметром 30 м и общей высотой 4.35 м состоит из цилиндрического чана с коническим днищем высотой 1.35 м (рисунок 2.2). В центре чана расположена разгрузочная воронка (рисунок 2.3), имеющая патрубки для разгрузки сгущенного продукта. Также к конусу подводятся патрубки для аварийной разгрузки сгустителя или для подачи воды в конус при чрезмерном уплотнении осадка, а по борту чана – кольцевой сливной желоб (рисунок 2.4). В центре чана на уровне поверхности осаждения установлено загрузочное устройство для приема пульпы из питающей коробки (рисунок 2.5) – питающий колодец с поперечной решеткой внутри для улавливания случайных крупных предметов и для гашения скорости потока поступающей пульпы (рисунок 2.6). На стальной ферме, опирающейся на стенки чана, установлен привод центрального вала и механизм подъема гребковой рамы. Вал смонтирован в центре чана в опорных подшипниках, установленных на мостовой ферме. Гребковая рама сгустителя состоит из двух радиально расположенных граблин с прикрепленными к ним гребками в количестве 20 шт. (рисунок 2.7). Рама при помощи крестовин и тяг укреплена на конце центрального вала. Гребки установлены под определенным углом, позволяющим перемещать осадок к центру.

Механизм привода центрального вала включает электродвигатель, редуктор, червячную передачу, помещенные в литом корпусе. Для предотвращения поломки приводного механизма и гребковой рамы при перегрузках вал вместе с граблинами может перемещаться на некоторую высоту в вертикальном направлении.

Геометрия рассматриваемого сгустителя представлена на рисунке 2.1.

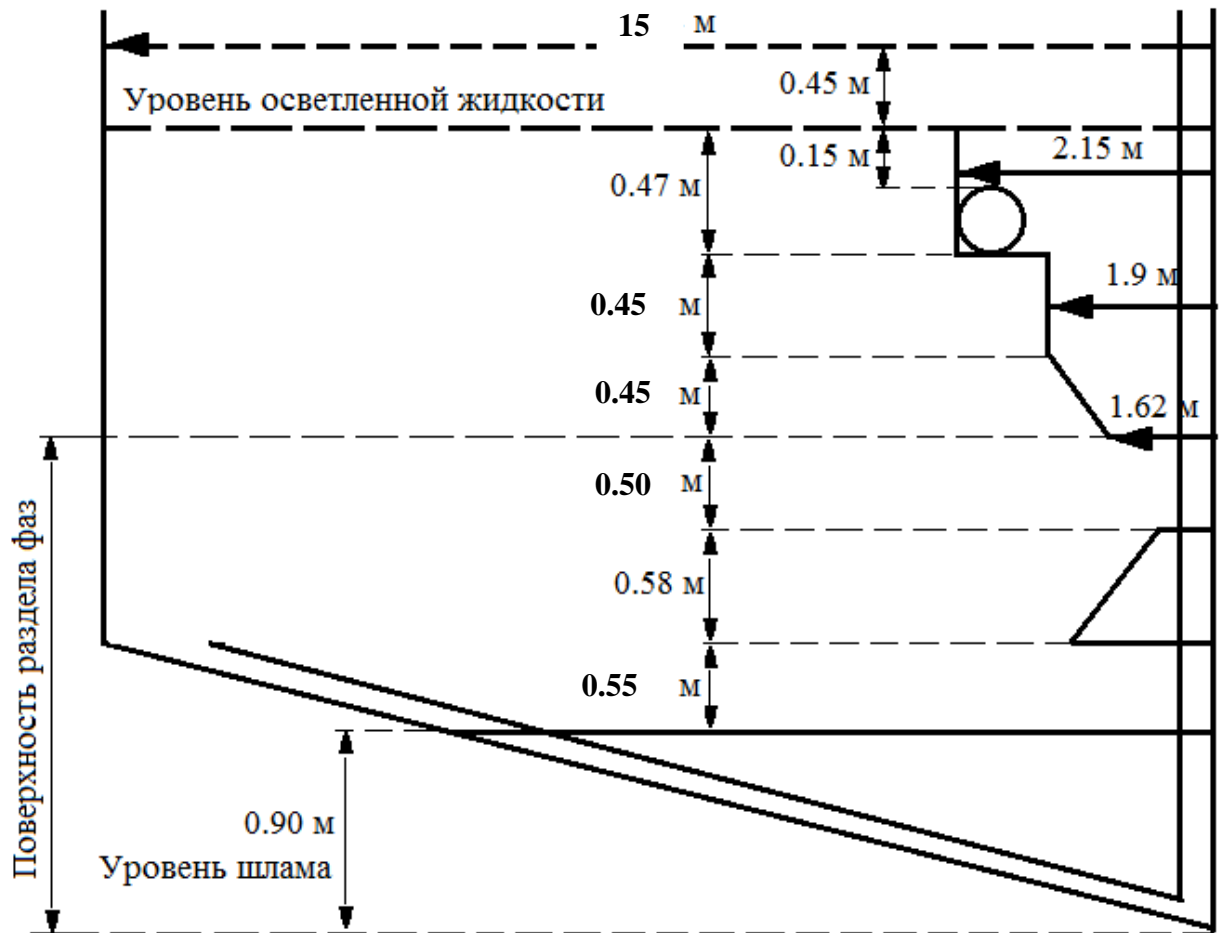


Рисунок 2.1 – Геометрия сгустителя и питающего колодца



Рисунок 2.2 – Радиальный одноярусный сгуститель классического дизайна



Рисунок 2.3 – Разгрузочная воронка в центре чана



Рисунок 2.4 – Кольцевой сливной желоб



Рисунок 2.5 – Распределительная питающая коробка



Рисунок 2.6 – Питающий колодец с поперечной решеткой внутри для улавливания случайных крупных предметов и для гашения скорости потока поступающей пульпы



Рисунок 2.7 – Гребковая рама сгустителя – две радиально расположенных граблины с прикрепленными к ним гребками

Параметры, характеризующие состояние технологического процесса, представлены в таблице 2.1:

Таблица 2.1 – Параметры технологического процесса

№ п/п	Параметр	Значение параметра	Единица измерения параметра
1	Рабочая температура процесса	102	$^{\circ}\text{C}$
2	Объемная скорость подачи пульпы в питании сгустителя	300 - 430	$\text{м}^3/\text{ч}$
3	Объемная скорость откачки сгущенного продукта	80 - 100	$\text{м}^3/\text{ч}$
4	Концентрация твердого в пульпе питания	1.29 – 2.00	% об.долей
5	Концентрация твердого в сгущенном слое	2.83 – 6.00	% об.долей
6	Концентрация раствора флокулянта	0.50	%
7	Объемная скорость подачи раствора флокулянта	1200 - 1500	л/ч
8	Дозировка флокулянта	0.20	кг/т
9	Плотность твердой фазы	3200	$\text{кг}/\text{м}^3$
10	Плотность жидкой фазы	1240	$\text{кг}/\text{м}^3$
11	Вязкость суспензии при рабочей температуре	0.0021	Па·с

2.2 Методика экспериментальных исследований красного шлама

Одной из трудностей процесса сгущения является определение параметров, необходимых при моделировании процесса, в лабораторных условиях. Чтобы игнорировать ошибки, вызванные процессом консолидации, большинство экспериментальной работы по определению параметров относится исключительно к седиментации.

Целью проведения экспериментальных исследований, является определение гранулометрического состава твердой фазы в питающей суспензии, скорости Стокса $U_{s\infty}$, значения гелевой точки (критической концентрации) φ_c , значения индекса стесненного осаждения или индекса Ричардсона - Заки n , функции плотности потока Кинча $f_{bk}(\varphi)$.

Ход экспериментальных исследований:

- 1 Определение гранулометрического состава исследуемого КШ;
- 2 Определение концентрации КШ в исследуемой пульпе;
- 3 Седиментационный тест промышленного образца КШ:
 - a) Приготовление раствора флокулянта;
 - b) Проведение теста на осаждение в серии мерных цилиндров;
- 4 Обработка результатов, определение констант моделирования.

Пульпа питания отбиралась на участке «Сгущение и промывка КШ» с РК.

2.2.1 Гранулометрический состав исследуемого красного шлама

Гранулометрический состав твердых частиц определялся на лазерном анализаторе твердых частиц Analysette 22 NanoTec от Fritsch. Область измерения составляет от 0.01 до 2000 мкм.

Используемый материал:

- Проба суспензии объемом примерно 2 см³;
- Дисперсант - раствор двухмолярного хлорида натрия объемом примерно 500 мл (58,5 г NaCl, разведенные в 500 мл дистиллированной воды) с рН больше 7.

Ход работы:

1. Проба/образец добавляется непосредственно в заранее заполненную жидким дисперсантом до необходимого уровня ванну, где благодаря турбулентному потоку циркуляционного насоса мощностью 100 Ватт перемешивается с раствором дисперсанта;

2. При необходимости проводится диспергирование агломератов. В данной работе диспергирование не проводилось, т.к. проба КШ не характеризуется агрегацией мелких частиц в растворе дисперсанта, в противном случае необходимо диспергировать пробу в растворе ванны ультразвуковой обработкой. Мощность 50 Ватт;

3. Циркуляционный насос прокачивает жидкость через проточную кювету, при этом необходимо обеспечить однородность в проточной ячейке, что влияет на качество данных и общее время измерений;

4. При протекании дисперсанта на диспергированных частицах образца происходит рассеяние, интенсивность которого в режиме реального времени фиксируется детекторами, размещенными в ключевых позициях вокруг кюветы;

5. Обработка полученных результатов, представление данных в виде нормального и кумулятивного распределения частиц (рисунок 2.8), определение среднего диаметра частиц исследуемого КШ.

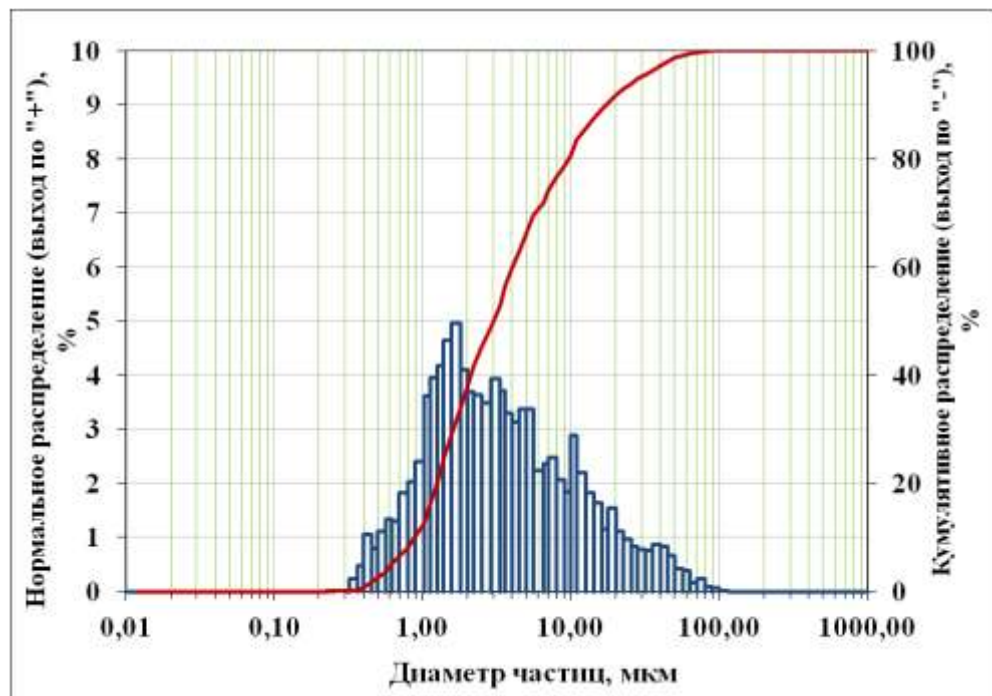


Рисунок 2.8 – Гранулометрический состав исследуемого образца КШ

Анализируя полученные данные, можно сказать, что состав исследуемого КШ полидисперсный, а, следовательно, содержит как структурированные, так и неструктурированные гидросмеси с довольно широким диапазоном размеров частиц, но процент содержания мелких фракций в питающей пульпе сгустителя очень высок, и характеристики, присущие для структурированных гидросмесей, оказывают сильное влияние на весь объем сгущаемой пульпы. Структурированные гидросмеси характеризуются существованием их в покое, т.е. коагуляционные связи между частицами, вследствие их межмолекулярного взаимодей-

ствия, оказывают существенное начальное сопротивление сдвигу упругими деформациями структурной решетки. Сплошная сетчатая структура занимает весь объем дисперсной среды. Чем выше концентрация твердой фазы и чем мельче твердые частицы, тем прочнее становятся структурные связи.

Структурообразованию способствует преимущественное содержание в гидросмеси частиц класса 0-0.004 мкм [53, 54, 55]. Благодаря наличию взвешенных частиц структурированные гидросмеси по сравнению с несущей жидкостью имеют повышенную кажущуюся вязкость, которая зависит от концентрации дисперсных частиц и их крупности, что также способствует стабильности гидросмесей. Для неструктурированных же смесей характерно существование в движении, отсутствие силового взаимодействия между частицами [55, 56].

По результатам анализа грансостава видно, что в основном твердое представлено мелкими классами, из которых класс < 0.005 мм – 75.19 %, а значит можно сказать, что для данных КШ гравитационные методы осветления должны сопровождаться процессами флокуляции и агрегации частиц [56].

Анализ гранулометрического состава пульпы позволяет определить лишь преобладающий размер агрегатов, т.к. на дисперсность КШ влияет целый ряд факторов: количество времени между отбором пробы для анализа и процессом проведения анализа, условия хранения и транспортировки проб, также влияют химико-минералогический состав исходного боксита, степень помола боксита на первых стадиях байеровского процесса, химическое диспергирование частиц боксита в процессе автоклавного выщелачивания [56, 57, 58].

2.2.2 Определение концентрации красного шлама в исследуемой пульпе

Для определения концентрации твердой фазы в пульпе пробу суспензии КШ объемом 100 мл помещают в сушильный шкаф для высушивания шлама до нулевой влажности. Пульпа питания в емкости, из которой будет отбираться проба для высушивания, должна быть хорошо перемешана для равномерного распределения твердой фракции в объеме сосуда.

Проба пульпы высушивалась в сушильном шкафу LOIP LF-25/350 при температуре 200 °С в течение 14 часов до прекращения потери веса осадка. Определялась масса сухого высушенного осадка (6.32 г) и рассчитывалась концентрация твердой фракции в анализируемой пульпе питания: $\varphi_0 = \frac{m}{V} = 63.2 \text{ г/л}$.

Полученная концентрация соответствует диапазону концентраций питающей сгуститель пульпы.

Фазовый состав состоит из ряда минералов, содержащих гидратную воду, не удаляющуюся при сушке при температуре 200 °С, что составляет примерно 5-10 % от общего содержания влаги.

2.2.3 Седиментационный тест промышленного образца красного шлама

Седиментационный тест проводился в серии мерных цилиндров с различной начальной концентрацией твердых частиц во флокулированной суспензии.

Оборудование:

- Мерный цилиндр с рабочей высотой 35 см и внутренним диаметром 4 см с нанесенной масштабной линейкой – 6 шт.;
- Пульпа питания объемом 5 л;
- Жидкость для разбавления пульпы объемом 4 л;
- Раствор рабочего флокулянта;
- Термостат – 1 шт.;
- Шприц объемом от 1 мл – 6 шт.;
- Плунжер – 1 шт.;
- Секундомер – 1 шт.

2.2.4 Приготовление раствора флокулянта

На промышленном объекте применяется флокулянт фирмы Cytex Industries серии НХ-3000 (модифицированный гидроксамированный флокулянт на основе ПАА).

Согласно технологии, реализуемой на производственном объекте, концентрация подаваемого в сгуститель раствора флокулянта равна 0.5 %. Флокулянт поступает на производство в виде эмульсии, далее в цепочке технологического процесса изготавливается раствор флокулянта, который в последствие (но не ранее, чем через 30-60 мин) поступает в сгуститель методом впрыскивания в питающий колодец. В процессе изготовления раствора флокулянта из эмульсии используются сточные воды (реже конденсат) с добавлением NaOH (10 г/л), что обеспечивает дополнительный гидролиз флокулянта, а, следовательно, во многих случаях позволяет сократить его расход по сравнению с расходом негидролизованного полимера. Повышение эффективности действия с увеличением степени гидролиза объясняется образованием ассоциатов макромолекул, длина которых больше длины отдельных молекулярных цепей, или гидролизом амидных групп до групп R-COONa, что способствует разворачиванию клубкообразных молекул полимера.

В лабораторном эксперименте использовался флокулянт фирмы Cytec Industries серии SUPERFLOC HX-3000 (модифицированный гидроксамированный флокулянт на основе ПАА) в виде эмульсии (концентрация 23%), который активно используется на промышленных объектах для процессов сгущения КШ, например на ветке сгущения на УАЗ.

Оборудование:

1. вода объемом 49 мл;
2. гидроксид натрия (NaOH) – 0,49 г;
3. магнитная мешалка – 1 шт.;
4. лабораторный стакан стеклянный емкостью 100 мл;
5. пластиковый шприц емкостью от 1 мл – 1 шт.

Ход работы:

1. Тщательно растворить NaOH в объеме воды в лабораторном стакане;

2. Включить мешалку (частота вращения должна быть не более 100 об/мин, т.к. было экспериментально доказано, что скорость седиментации флокул, образующихся при обработке суспензии ПАА, растворенным при частоте вращения ротора мешалки 100 об/мин., в 2-3 раза выше, чем при использовании ПАА, раствор которого приготавливался при частоте вращения ротора мешалки 1000 об/мин);

3. По стенке вихревой воронки с помощью шприца влить 1.1 мл эмульсии, направляя поток из шприца в центр воронки по касательной одной струей, после 15 секунд интенсивного перемешивания, раствор оставить на тридцать минут, для того, чтобы прошла гидратация молекул флокулянта;

4. Результат – 0.5% раствор флокулянта.

2.2.5 Седиментационный тест промышленного образца красного шлама

1. Образец пульпы концентрацией 63.2 г/л необходимо тщательно перемешать для равномерного распределения твердого в объеме и термостатировать при рабочей температуре процесса;

2. Провести тест на осаждение в серии мерных цилиндров с флокулированной суспензией при различных начальных концентрациях пульпы питания, определить зависимость высоты осадка пульпы от времени;

3. Доза флокулянта определялась из характеристик контроля исследуемого технологического процесса и равна 1.45 мл раствора флокулянта концентрацией 0.5 %;

4. Для каждого цилиндра при перемешивании необходимо использовать одинаковое количество движений плунжером;

5. Выводы по полученным данным представлены далее в работе.

2.2.6 Обработка результатов экспериментальных исследований

2.2.6.1 Скорость Стокса. Индекс стесненного осаждения

Результаты тестов на осаждение проб КШ, поступающих на передел сгущения и промывки в секцию сгущения, представлены на рисунках 2.9, 2.10.

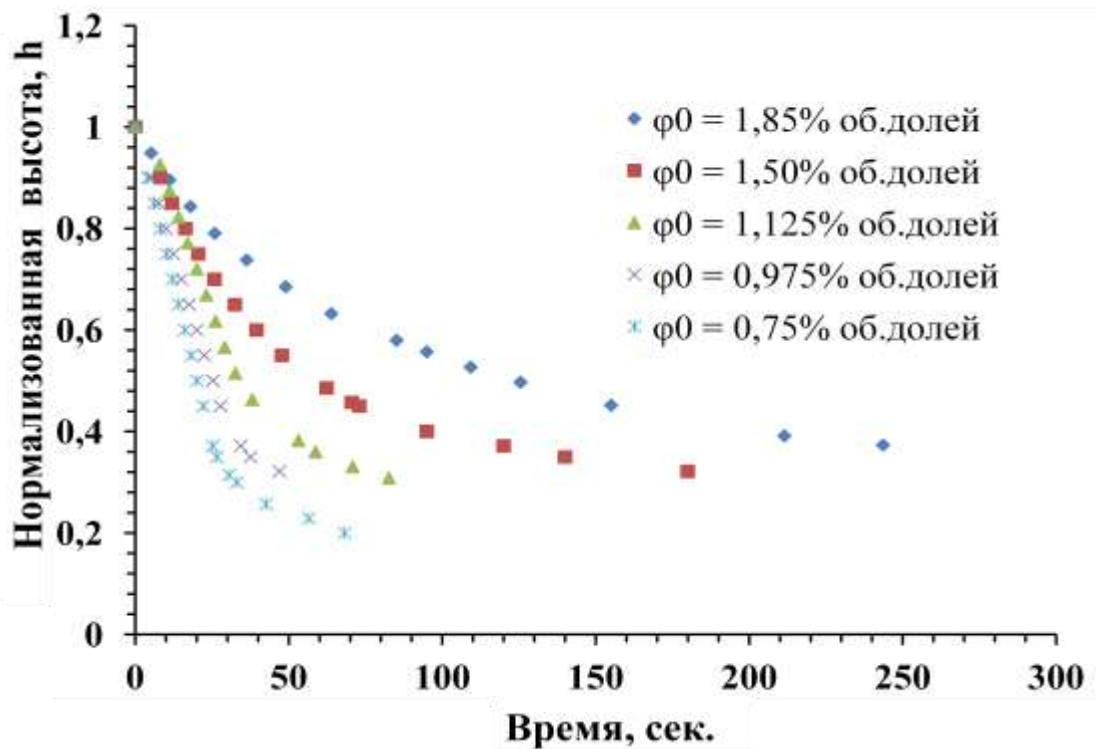


Рисунок 2.9 – Кривые седиментации флоккулированной суспензии с начальными концентрациями твердых частиц 24 - 60 г/л (0.75 – 1.85 % об.долей)

На рисунке 2.9 представлены кривые седиментации флоккулированной суспензии с различными начальными концентрациями твердой фракции. Как видно из графика, условно можно разделить кривые осаждения на 3 группы [56]:

- Кривые с начальным содержанием твердого ниже, чем 1.5% об.долей;
- Кривая с начальным содержанием твердого 1.5% об.долей;
- Кривые с начальным содержанием твердого выше, чем 1.5% об.долей.

При более низких концентрациях (т.е. ниже, чем 1.5% об. долей), нельзя с уверенностью говорить о формировании структурной сетки между соприкасающимися друг с другом кластерами (флокулами) [56].

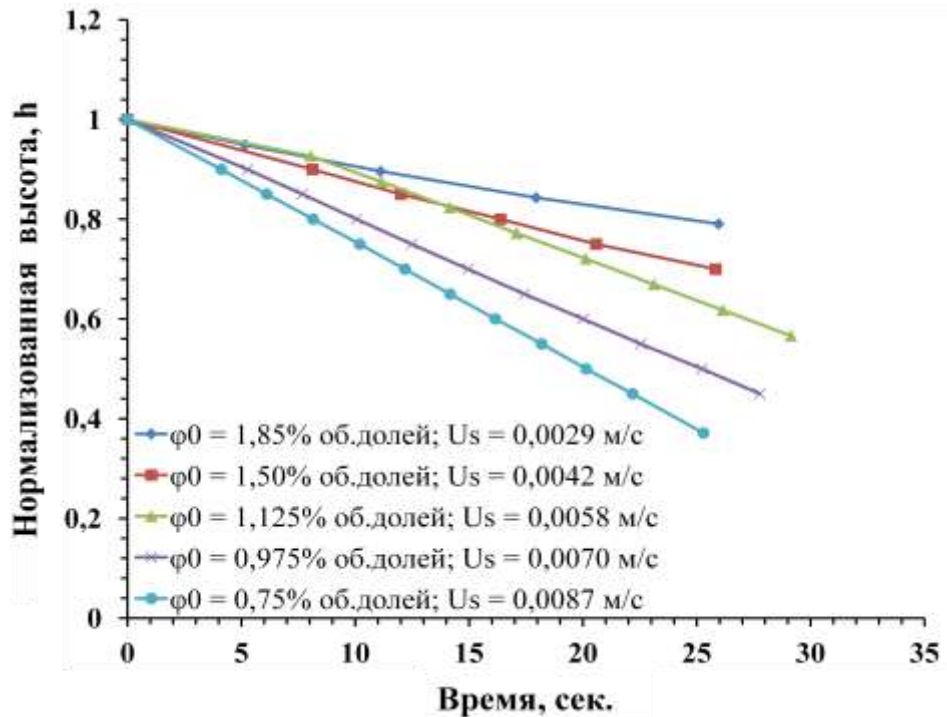


Рисунок 2.10 – Начальные скорости осаждения U_s флоккулированной суспензии с концентрациями твердых частиц 24 - 60 г/л (0.75 – 1.85 % об.долей)

При исходной концентрации твердого 1.5% об. долей наблюдается на начальном этапе эксперимента взаимодействие друг с другом неустойчивых кластеров (флокул) с образованием стабильных агрегатов, которые в последствие осаждаются с постоянной скоростью [56]. Кривая седиментации с начальной концентрацией твердого в суспензии более 1.5% об. долей показывает поведение суспензий при сжатии, когда флокулы оказывают сжимающие силы друг на друга [56]. В литературе можно найти различные методы вычисления скорости осаждения при помощи данных, полученных экспериментально, например, в работах Фонта 1992 г. и Батта 1997 г. На следующих графиках показан результат расчета скорости осаждения при помощи центрально-разностного метода с использованием уравнения: $-\left(\frac{dH}{dt}\right)_n = \frac{H_{n-1} - H_{n+1}}{t_{n+1} - t_{n-1}}$ [56].

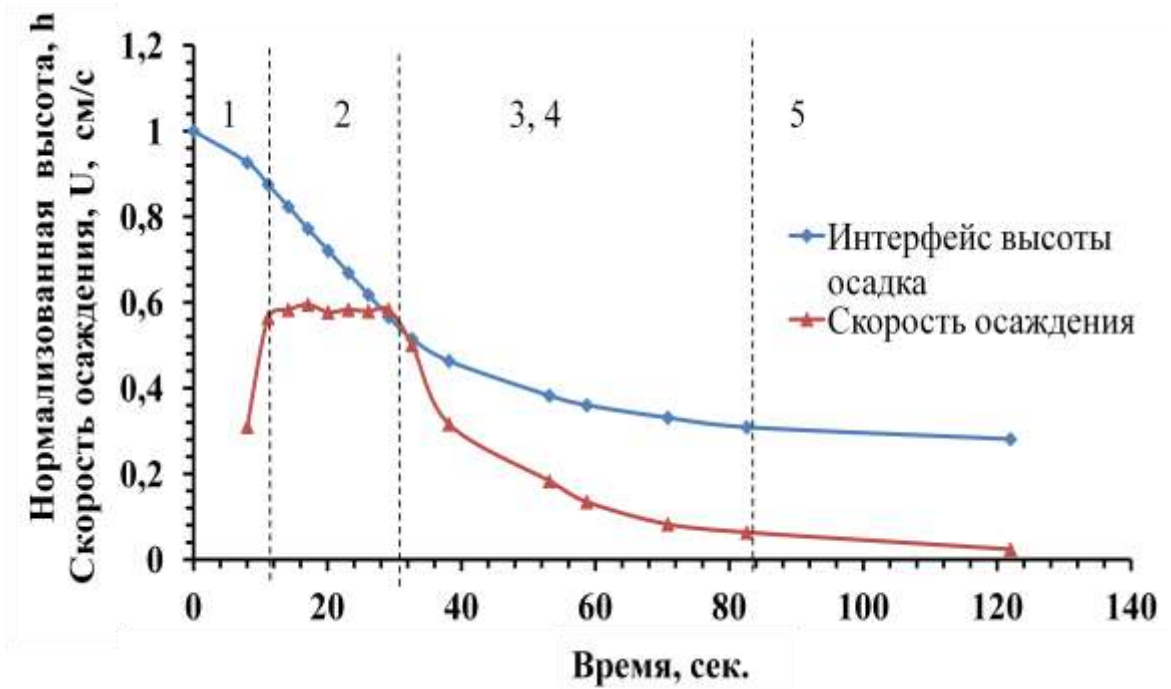


Рисунок 2.11 – Кривые зависимости скорости осадения и высоты осадка для флокулированной суспензии от времени с начальной концентрацией твердых частиц 36 г/л (1.125 % об. долей)

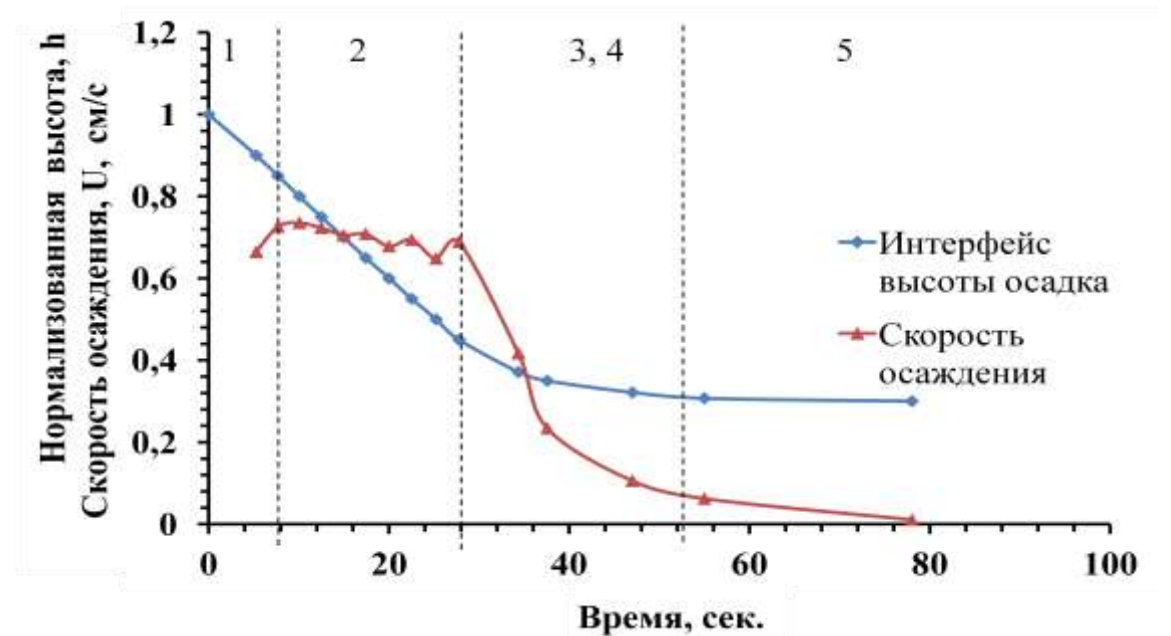


Рисунок 2.12 – Кривые зависимости скорости осадения и высоты осадка для флокулированной суспензии от времени с начальной концентрацией твердых частиц 31.2 г/л (0.975 % об. долей)

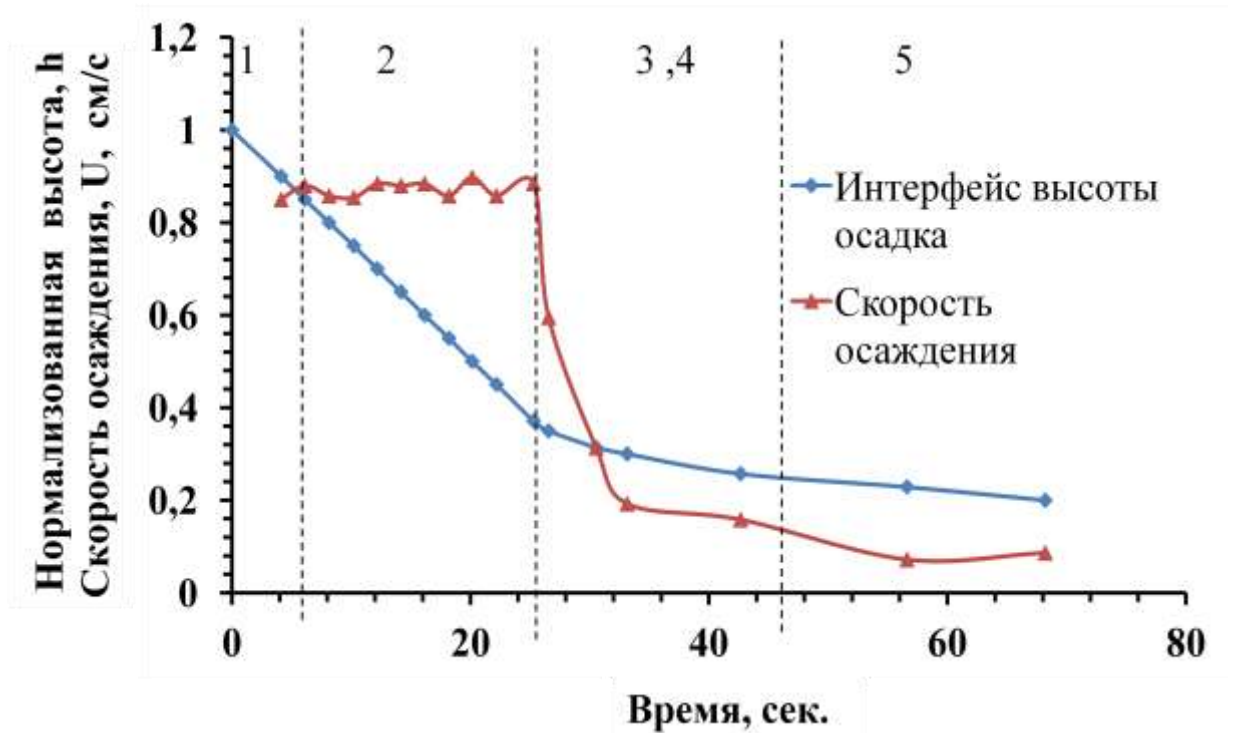


Рисунок 2.13 – Кривые зависимости скорости осаждения и высоты осадка для флокулированной суспензии от времени с начальной концентрацией твердых частиц 24 г/л (0.75 % об.долей)

Зоны стремительного снижения скорости указывают на влияние инерционных сил, действующих на процесс осаждения кластеров. В большинстве лабораторных тестов на периодическую седиментацию сила инерции не учитывается из-за ее незначительного влияния. Однако Диксон и другие в работах 1976 г. доказали, что на практике инерционные силы нельзя игнорировать. Они продемонстрировали, что при любой начальной концентрации суспензии между осадком и начальной зоной концентрации постоянно расширяющаяся зона не формируется, если учитывать силу инерции. При этом Диксон сделал вывод о несостоятельности теории Кинча и, следовательно, его предположения о том, что скорость осаждения зависит исключительно от концентрации твердых частиц.

На кривых осаждения для суспензий с начальными концентрациями в диапазоне от 0.75% до 1.125% об. долей отчетливо прослеживаются зоны стремительного снижения скорости как на кривой осаждения, так и на кривой изме-

нения скорости [56]. На кривых изменения скорости при увеличении начальной концентрации твердых частиц в суспензии наблюдается незначительный индукционный период. Скорее всего, именно в это время первичные и вторичные флоккулы начинают взаимодействовать друг с другом, соединяясь в более крупные агрегатные образования, которые способны оседать более быстро. Это является причиной увеличения скорости в начальный промежуток времени для всех трех кривых осаждения. Данное явление явно продемонстрировано на рисунке 2.11 и в меньшей мере – на рисунке 2.12. На рисунке 2.13 никаких доказательств наличия индукционного периода нет [56].

На кривых отчетливо прослеживаются участки свободного осаждения с постоянной скоростью осаждения. Чем выше концентрация твердого в питающей суспензии, тем меньше скорость свободного осаждения. На рисунках 2.12, 2.13 пики, возникшие в конце зоны 2 – зоны свободного осаждения (на 20 – 30 с), возможно, свидетельствуют о начале формирования пор в структурах, образованных неустойчивыми кластерами, или разрушении этих конструкций [56].

Кривые осаждения (рисунки 2.14, 2.15) в обоих случаях имеют типичную вогнутую форму, кривые скорости осаждения представлены непрерывными, медленно и плавно переходящими в режим консолидации кривыми [56].

Шум, наблюдаемый на обоих графиках скоростей осаждения, свидетельствует о формировании каналов, что влечет за собой временное увеличение скорости осаждения твердых веществ, а в последствие уменьшение скорости из-за «выталкивания» жидкости и консолидации структур флоккул [56].

Основываясь на уравнении Ричардсона и Заки (3.6, 3.8) и на работах J. Yang, and A. Renken, Alexander Ardila Labiosa, Bruno Amedeo Di Giovanni, произведен расчет индекса стесненного осаждения – индекса Ричардсона и Заки и скорости свободного осаждения – скорости Стокса. Результат представлен на графике (рисунок 2.16) [56].

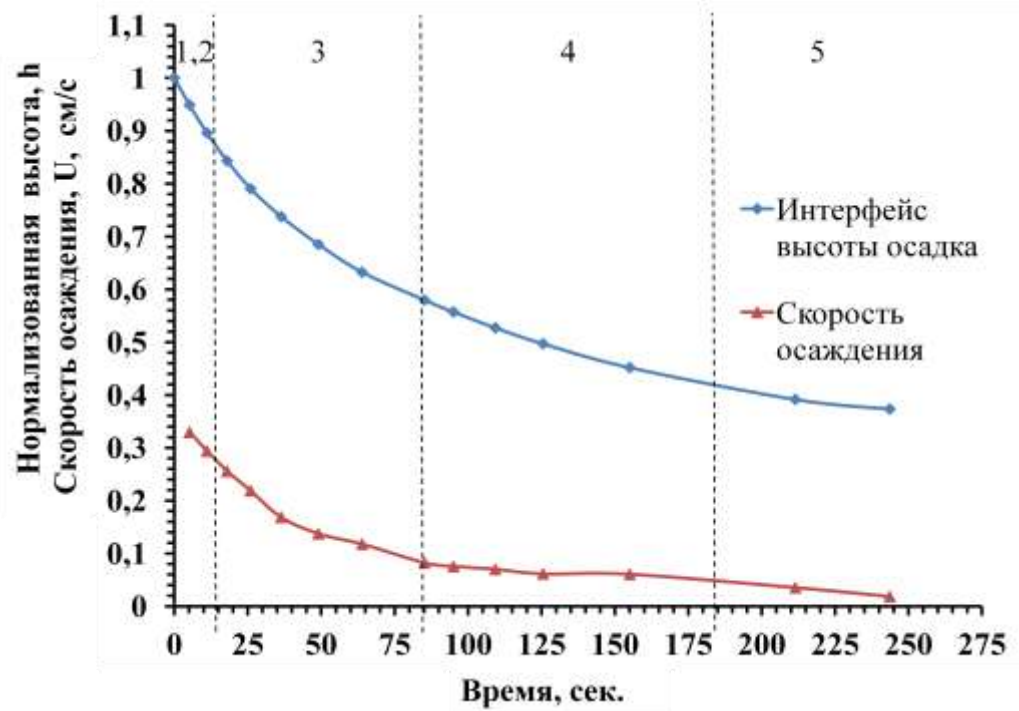


Рисунок 2.14 – Кривые зависимости скорости осадения и высоты осадка для флокулированной суспензии от времени с начальной концентрацией твердых частиц 60 г/л (1,85 % об.долей)

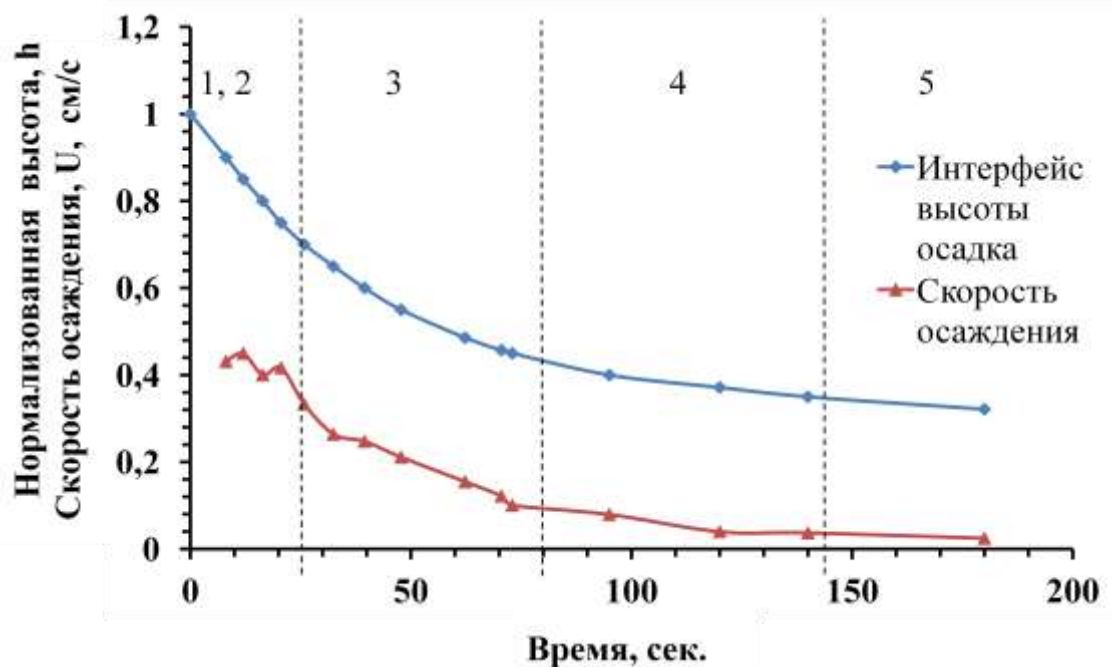


Рисунок 2.15 – Кривые зависимости скорости осадения и высоты осадка для флокулированной суспензии от времени с начальной концентрацией твердых частиц 48 г/л (1,5 % об.долей)

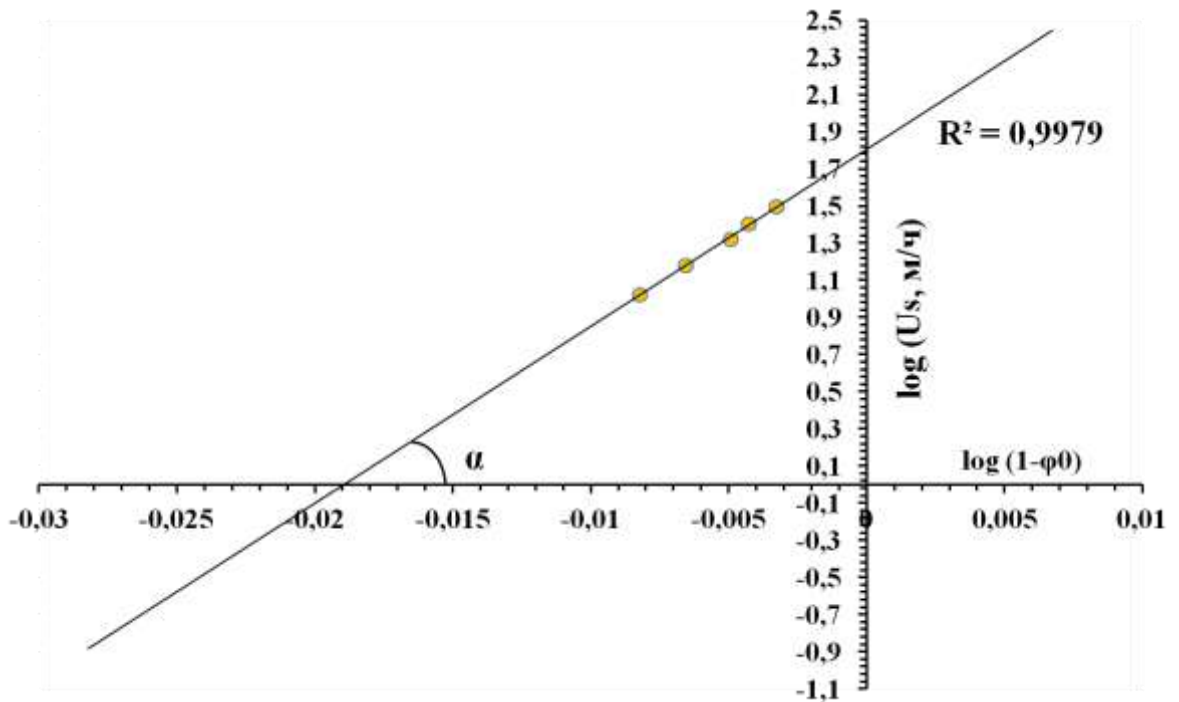


Рисунок 2.16 – Зависимость $\log(1-\varphi_0) - \log(U_s)$, полученная при логарифмировании уравнения Ричардсона-Заки

Данный график помогает рассчитать индекс стесненного осаждения (угол наклона кривой к оси X) – 89.39 и скорость свободного осаждения - скорость Стокса (точка пересечения аппроксимирующей линейной кривой и оси Y) – 63.096 м/ч [56].

Основываясь на работах Ричардсона и Заки, Джахавери и Дика, Ноука, Фонта, Чэня, Yang, and A. Renken, M.A.T. Bisschops, K.C.A.M. Luyben, и L.A.M.v.d. Wielen, можно сделать вывод, что индекс стесненного осаждения должен быть больше 1 и находиться в пределах от 2.39 до 4.65 в зависимости от числа Re. Но данное заключение можно сделать применительно к частицам идеальной сферической формы. Эмпирический параметр n является мерой взаимодействия частиц, значение индекса стесненного осаждения – 89.39 подтверждает фрактальную природу флокул [56].

В работах Дэвиса 1977 г. индекс n находится в диапазоне от 30 условных единиц для различных твердых частиц, растворенных в различных жидкостях, включая воду. При этом значение диаметра, полученное из величины скорости

свободного осаждения и с использованием значения плотности начальных твердых частиц, поступающих с питанием, хорошо коррелируется со значением, полученным при лабораторном анализе размеров агрегировавших частиц. Таким образом, данные результаты показывают, что кластеры формируются только из твердых частиц, а не из смеси жидкости и твердых частиц, что приводило бы к изменению плотности агрегатных образований [56].

В работах Alexander Ardila Labiosa, направленных на изучение динамики сгущения и промывки КШ глиноземного производства, были получены индексы стесненного осаждения меньше 1, что также противоречит выводам, сделанным в трудах Ричардсона и Заки и других исследователей. Bruno Amedeo Di Giovanni, изучая процесс осаждения суспензии, получил в своей работе значения индекса в диапазоне от 30 до 140 условных единиц в зависимости от различных режимов смешивания суспензии с флокулянтном на начальных этапах эксперимента [56].

Также немалое влияние на значение индекса стесненного осаждения в экспериментальных условиях оказывает граничный эффект или эффект стенки сосуда, в котором проходит процесс седиментации. Индекс n в лабораторных экспериментах имеет значение более высокое, чем на реальном объекте. Более подробная информация об эффекте стенки на процесс седиментации рассмотрен во второй главе, таблицы 3.1, 3.2.

В связи с этим нельзя отвергать полученные при экспериментальных исследованиях значение индекса стесненного осаждения 89.39 условных единиц [56].

Компания CSIRO в течение недели проводила в лабораторных условиях (в сосуде) и на реальном объекте исследования по осаждению пульпы питания, где концентрация пульпы питания около 60 г/л. Был сделан вывод, что скорость осаждения, полученная в лабораторных условиях в несколько раз выше, чем скорость, полученная на реальном ОУ (рисунок 2.17). Из чего можно сделать

вывод, что «эффект стенки» оказывает сильное влияние и на скорость свободного осаждения.

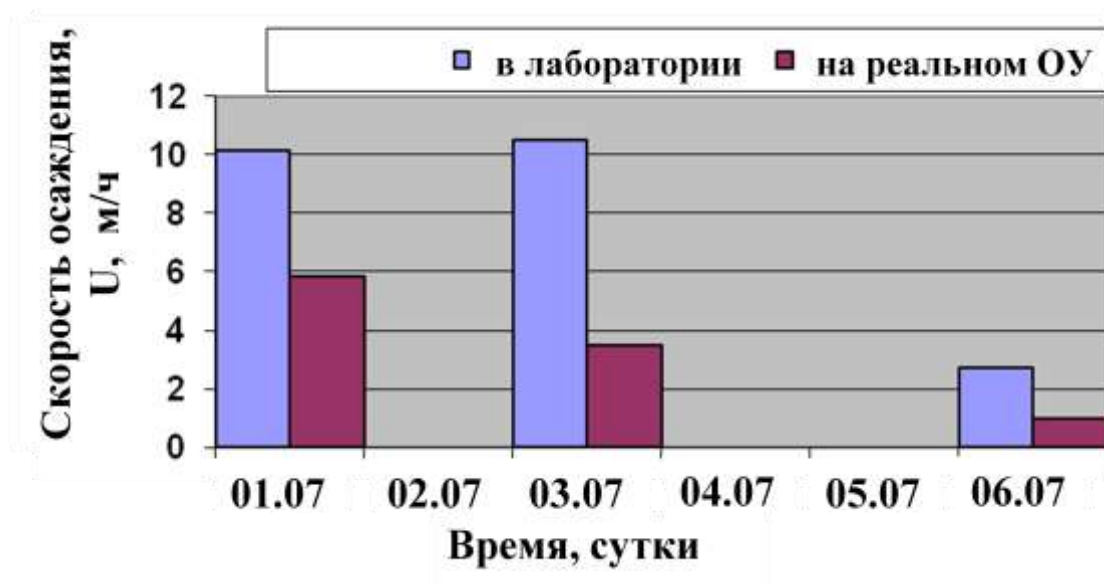


Рисунок 2.17 – Результаты экспериментальных исследований компании CSIRO на промышленном объекте по осаждению флокулированной суспензии

Используя вывод, полученный CSIRO, можно рассчитать скорость Стокса для единичной частицы с поправкой на реальный ОУ, которая будет равна 0.013 м/с.

2.2.6.2 Гелевая точка или критическая концентрация

Следующим важным параметром, который необходимо получить из лабораторных испытаний – гелевая точка или критическая концентрация.

Для поиска значения критической концентрации использовался метод, описанный в работе [1, 2]. Концентрация в сгущенном слое φ_{UF} определяется из уравнения материального баланса $\varphi_0 N_0 = \varphi_{UF} N_{UF}$, где φ_0 – начальная концентрация в питающей суспензии, N_0 – рабочая высота цилиндра, N_{UF} – высота постели (сгущенного слоя), которая определялась по истечению 24 ч эксперимента для каждого опыта. Результат представлен на рисунке 2.18 [56].

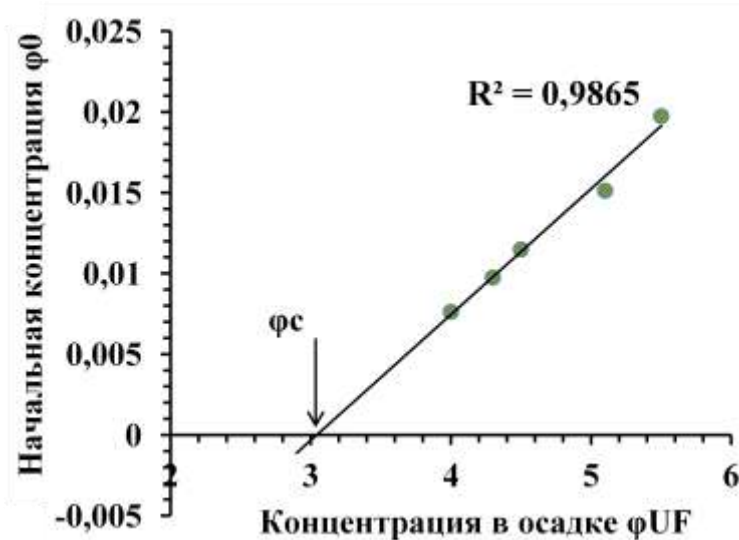


Рисунок 2.18 – График зависимости начальной концентрации в питающей суспензии φ_0 от концентрации в сгущенном осадке φ_{UF}

Таким образом графически найдена критическая концентрация для исследуемого процесса и равна 3.04 % об. долей. В исследуемом процессе 0.0304 об.долей равны 97.28 г тв/л [56].

2.2.6.3 Функция плотности потока Кинча

Важным параметром при моделировании процесса осаждения является функция плотности потока Кинча f_{bk} . На рисунке 2.19 представлены зависимости функций плотности потока Кинча для периодического процесса осаждения f_{bk} от начальной концентрации твердого в питающей пульпе φ_0 [56].

Используемый в лабораторных экспериментах диапазон начальных концентраций 0.075 % - 1.85 % об.долей позволил рассчитать зависимость функции плотности потока Кинча от начальной концентрации пульпы питания для $\varphi_0 < \varphi_c$: $f_{bk}(\varphi) = 0.0175 \cdot \varphi_0 \cdot (1 - \varphi_0)^{89.39}$ (м/с). Как известно, функция плотности потока для $\varphi_0 \geq \varphi_c$ подчиняется другой зависимости, где $k_0 = f_{bk}(\varphi_c) = 3.454E-05$, для определения коэффициента m необходимо провести дополнительные исследования в более широком диапазоне начальных концентраций пульпы [56].

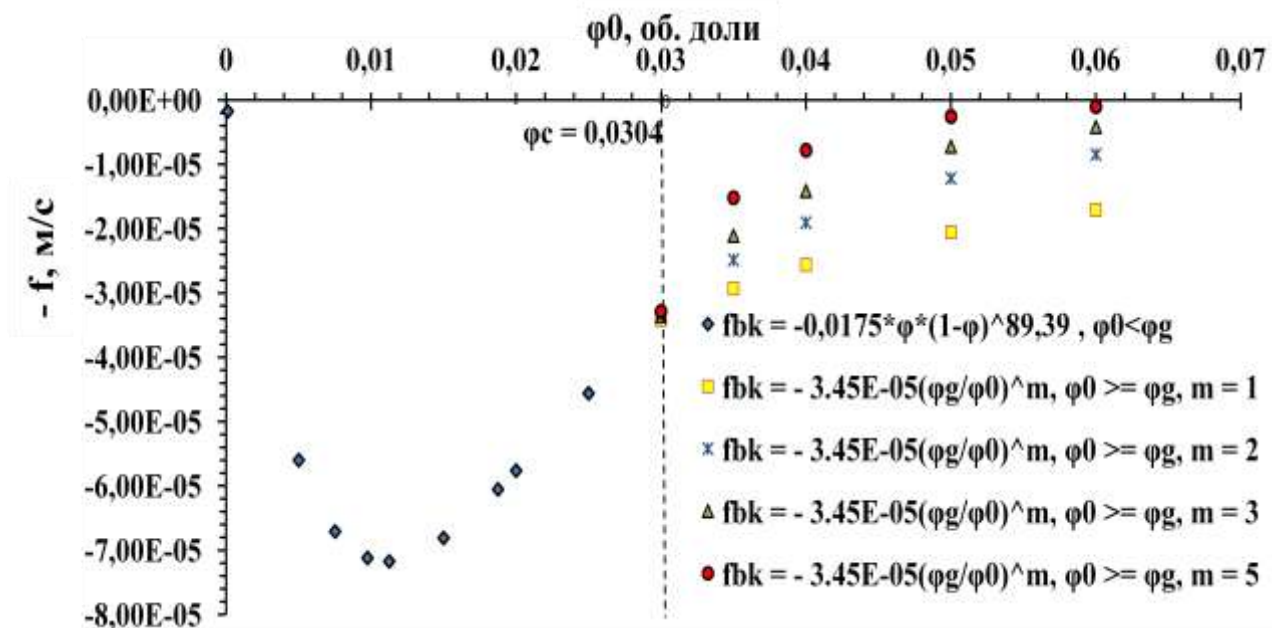


Рисунок 2.19 – График зависимости функции плотности потока Кинча от начальной концентрации твердого в питающей пульпе φ_0

На рисунке 2.19 рассмотрены кривые функции плотности потока от различных значений коэффициента m [1, 2, 3, 5] в зоне уплотнения осадка, которые характеризуют проницаемость осадка.

Концентрация сгущенного слоя φ_{UF} на реальном ОУ колеблется в диапазоне от 6 до 7 % об. долей, следовательно, кривая для зоны уплотнения при $m = 5$ близко к реальному значению описывает функцию $f_{bk}(\varphi)$ для данного процесса [56].

На рисунках 2.20, 2.21 рассмотрено влияние скорости Стокса $U_{s\infty}$ и индекса стесненного осаждения на функцию плотности потока для $\varphi_0 < \varphi_c$ [56]. Необходимо отметить, что при увеличении скорости Стокса как характеристики пульпы функция плотности потока увеличивается, максимальное значение функции $f_{bk}(\varphi)_{max}$ не сдвигается относительно оси X. При увеличении индекса стесненного осаждения n , максимальное значение функции плотности потока мобильно относительно осей X и Y, что наглядно отражает пунктирная линия на рисунках 2.20, 2.21 [56].

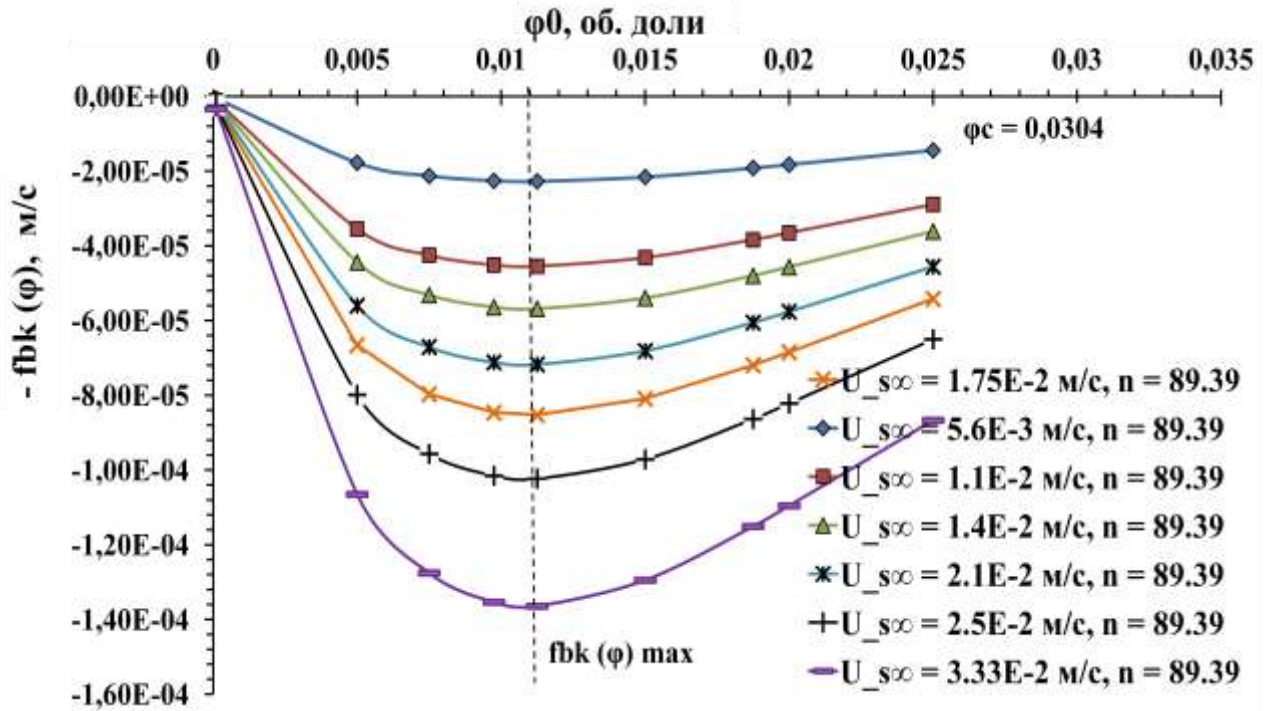


Рисунок 2.20 – График зависимости функции плотности потока Кинча от начальной концентрации твердого в питающей пульпе φ_0

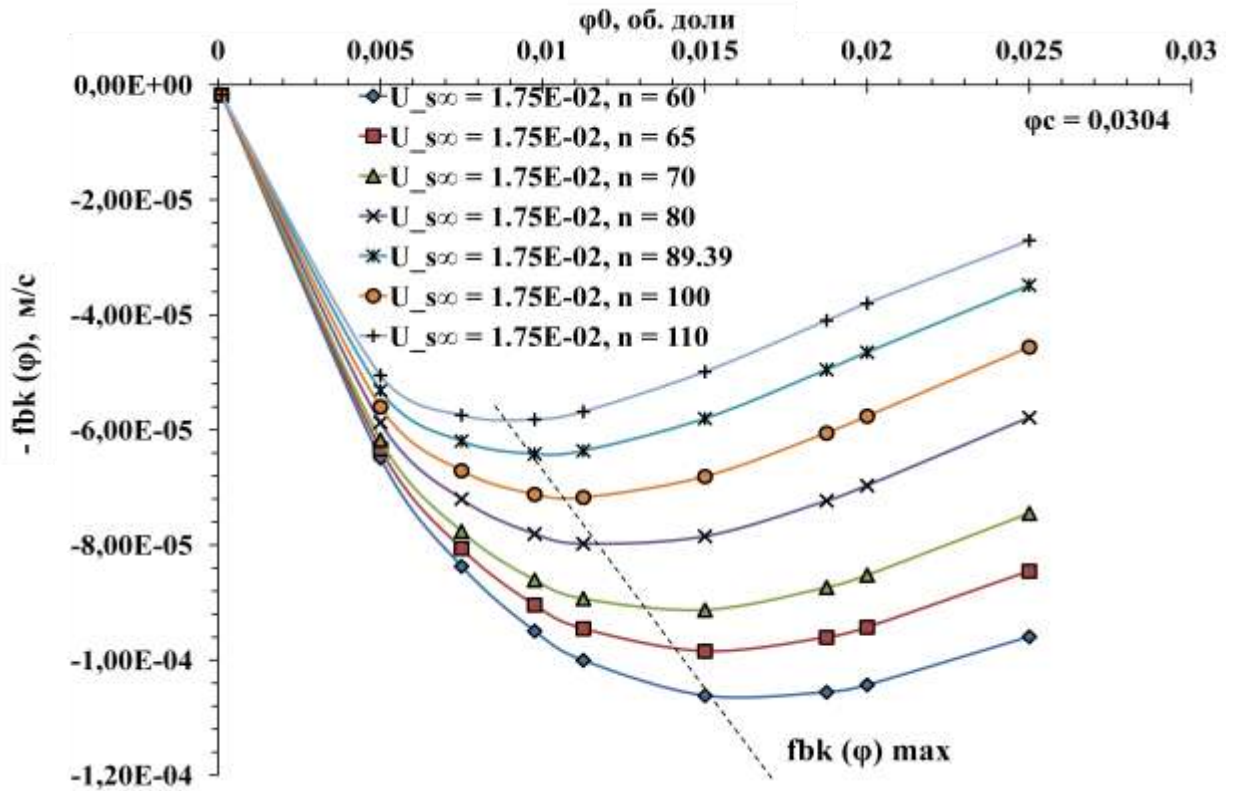


Рисунок 2.21 – График зависимости функции плотности потока Кинча от начальной концентрации твердого в питающей пульпе φ_0

Полученные в работе экспериментальные данные справедливы для периодического процесса седиментации: в лабораторных условиях взвесь вводили в мерный стакан с закрытым дном. Реальный ОУ характеризуется непрерывным процессом сгущения, где функция плотности потока Кинча равна $f_k = f_{bk}(\varphi) + q\varphi$, где q - скорость сгущенного потока суспензии из сгустителя [56].

Полученные в данном разделе работы параметры используются далее в работе при моделировании процесса сгущения.

2.3 Выводы по второй главе

1. Идентифицированы параметры моделирования: скорость Стокса, средний стоксовский диаметр частицы/флокулы, распределение частиц по размерам в питании, индекс стесненного осаждения и критическая концентрация;
2. Состав исследуемого КШ полидисперсный, в основном твердое представлено мелкими классами, из которых класс < 0.005 мм – 75.19 %, содержание в гидросмеси частиц класса $0 - 0.004$ мм способствует структурообразованию, а значит, для данных КШ методы осветления должны сопровождаться процессами флокуляции и агрегации частиц. Средневзвешенный диаметр $d_0 = 6.5$ мкм;
3. Чем выше концентрация твердого в питающей суспензии, тем меньше скорость свободного осаждения;
4. На кривых осаждения для суспензий с начальными концентрациями в диапазоне от 0.75 % до 1.125 % об. долей отчетливо прослеживаются зоны стремительного снижения скорости. Незначительный индукционный период указывает на то, что именно в это время первичные и вторичные флокулы начинают взаимодействовать друг с другом, соединяясь в более крупные агрегатные образования, которые способны оседать более быстро. Это является причиной увеличения скорости в начальный промежуток времени для всех трех кривых осаждения;
5. На кривых осаждения в конце зоны 2 – зоны свободного осаждения (на 20 – 30 с) возникшие пики («вулканы») свидетельствуют о начале формиро-

вания пор в структурах, образованных неустойчивыми кластерами, или разрушении этих конструкций (рефлокуляции или вторичной флокуляции). Процесс вторичной флокуляции является тем негативным фактором, который снижает показатели сгущения КШ;

6. Шум наблюдаемый на кривых осаждения в зоне 3 для суспензий с начальными концентрациями 1.5 % и 1.85 % об. долей свидетельствует о формировании каналов, что влечет за собой временное увеличение скорости осаждения твердых веществ, а в последствие уменьшение скорости из-за «выталкивания» жидкости и консолидации структур флокул, где флокулы оказывают сжимающие силы друг на друга;

7. Полученное значение индекса стесненного осаждения – 89.39 условных единиц выходит за диапазон значений от 2.39 до 4.65, характерного для частиц идеальной сферической формы, что подтверждает фрактальную природу образовавшихся в процессе эксперимента флокул (фрактальных кластеров). Большое влияние на значение индекса стесненного осаждения в экспериментальных условиях оказывает граничный эффект или эффект стенки сосуда, в котором проходит процесс седиментации, т.е. индекс n в лабораторных экспериментах имеет значение более высокое, чем на реальном объекте, что подтверждено работами Ричардсона и Заки, Джахавери и Дика, Ноука, Фонта, Чэня, Yang, and A. Renken, M. A. T. Bisschops, K. C. A. M. Luyben;

8. Графически найдена критическая концентрация для исследуемого процесса и равна 3.04 % об. долей. В исследуемом процессе 0.0304 об. долей равны 97.28 г тв/л.

Оценивая полученные в результате экспериментальных исследований данные, можно предоставить некоторые **рекомендации по направлениям дальнейших исследований:**

1. Необходимо провести новые эксперименты по осаждению твердых частиц, увеличивая при этом диапазон концентраций, чтобы повысить точность

измерений при изучении стесненного осаждения, взаимодействия твердых частиц друг с другом, активности порообразования;

2. Для изучения процесса в зоне уплотнения (предел текучести при сжатии) необходимо использовать и другие методы, например, фильтрацию под давлением;

3. Для построения правильной зависимости скорости осаждения, используя подход Ричардсона и Заки, и установления зависимости размера частиц/кластеров от неограниченного разбавления питающей пульпы, необходимо проанализировать размеры кластеров, образующихся в ходе экспериментальных исследований, и оценить корреляцию расчетных и экспериментальных значений размеров флокул, их формы.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ

3.1 Принцип работы сгустителя – осветлителя

3.1.1 Начальная скорость осаждения

Уравнение Стокса является основным уравнением, которое описывает осаждение сферических частиц в жидкой среде. Для вычисления скорости осаждения (U_S) сферических частиц в разбавленной суспензии при концентрации (φ) используется выведенное Батчелором в 1972 г. уравнение [1, 2, 59]:

$$U_S = U_{S\infty}(1 - n'\varphi) \quad (3.1)$$

где U_S – скорость осаждения Стокса, φ – концентрация твердых частиц и n' – константа. В дальнейшем для суспензий, содержащих различные по концентрации и размеру сферические частицы, Батчелор и Уэн внесли в уравнение (3.1) следующие изменения [1, 2, 59]:

$$U_{Si} = U_{S\infty i}(1 - \sum_j n_{ij}\varphi_j) \quad (3.2)$$

где n_{ij} – коэффициент двух параметров, определяемых уравнениями (3.3) и (3.4):

$$\eta = \frac{d_j}{d_i} \quad (3.3)$$

$$\xi = \frac{\rho_{Sj} - \rho_L}{\rho_{Si} - \rho_L} \quad (3.4)$$

где ρ_L — плотность жидкости, d_i , d_j , ρ_{Si} и ρ_{Sj} – значения диаметров и плотностей для i и j частицы соответственно. Когда концентрация твердых частиц в жидкости становится достаточно высокой (переход в режим стесненного осаждения) уравнение Стокса и Батчелора перестает работать [1, 2].

В литературе встречается несколько эмпирических уравнений для стесненного осаждения. Стэйнуэр в трудах 1944 г. описывает осаждение приблизительно однородных по форме частиц на межфазной границе «твердое вещество – жидкость» при помощи [1, 2]:

$$U_S = U_{S\infty} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \vartheta(\varepsilon) \quad (3.5)$$

где $\varepsilon = (1 - \varphi)$ — порозность и ϑ - коэффициент порозности. Скорости свободного осаждения и наклон прямой линии, проходящей через начало координат на графике $[U_S (1 - \varepsilon)]^{1/3}$ от ε , позволяет определить значение коэффициента формы [1, 2].

Однако наиболее популярным эмпирическим уравнением, которое описывает зависимость U_S от содержания твердой фракции в концентрированной суспензии, включающей в себя разнообразные взвешенные частицы, является уравнение Ричардсона и Заки 1954 г. [1, 2]:

$$U_S = U_{S\infty} \varepsilon^n \quad (3.6)$$

Путем построения графика с логарифмическим масштабом на обеих осях «скорость осаждения - порозность» на наклоне и отрезке прямой линии можно определить два эмпирических параметра: индекс стесненного осаждения (индекс Ричардсона-Заки) n и скорость Стокса $U_{S\infty}$.

Значение n , которое представляет собой степень взаимодействия частиц, является зависимостью от числа Рейнольдса и от соотношения диаметров частиц и сосуда. Для вязких суспензий наиболее точные значения находятся в диапазоне 4.65 до 5.5. Поскольку причина существования такого широкого диапазона не до конца понятна, обычно выбирается наиболее подходящее для n значение.

Многие авторы обычно заменяют значение плотности жидкости на значение плотности смеси (ρ_M) как Ричардсон и Мейкль в работах 1961 г., Барнеа и Мизрахи в работах 1973 г., Полетто и Джозеф и др. следующим образом [1, 2]:

$$\rho_M = \rho_S \varphi + \rho_L (1 - \varphi) \quad (3.7)$$

где φ — объемная концентрация твердых частиц. Однако эта формула не подходит для описания процесса осаждения частиц в водной среде. Этот вариант уравнения, с различными исправлениями, был применен для вязкой среды Барнеа и Мизрахи, Дэвисом и Доллимором, однако такие изменения не оправданы для описания поведения более крупных частиц, которые содержатся в суспензии наряду с небольшими взвешенными частицами [1, 2].

3.1.2 Скорость осаждения агрегировавших частиц в суспензиях

Первоначально, при наличии подходящих условий, частицы в суспензии могут начать взаимодействовать, формируя большие скопления, состоящие из твердых частиц и жидкости. В дальнейшем эти скопления могут трансформироваться в более крупные и стабильные агрегатные образования. Для расчета конечной плотности таких агрегатных образований необходимо учитывать жидкость как внутри них, так и между ними. Джавахери и Дик в работе 1969 г. писал, что порозность суспензии определяется пустотами между ее агрегатными образованиями. Для учета агрегатных образований в суспензии, в уравнение Ричардсона - Заки были внесены следующие изменения [1, 2]:

$$U_S = U_{S\infty}(1 - \varphi_A)^n \quad (3.8)$$

где φ_A - объемная совокупная концентрация. Расчет концентрации кластеров может быть сделан путем описания баланса твердых частиц. Исходя из единицы объема суспензии и приняв ее плотность равной сумме плотности сухих твердых частиц и плотности жидкости, получаем [1, 2]:

$$\rho_T = \rho_S \varphi_S + \rho_L(1 - \varphi_S) \quad (3.9)$$

Исходя из единицы объема суспензии и приняв ее плотность равной сумме плотности всех ее агрегатных образований и плотности оставшейся жидкости, получаем [1, 2]:

$$\rho_T = \rho_A \varphi_A + \rho_L(1 - \varphi_A) \quad (3.10)$$

где ρ_T — плотность суспензии.

Преобразовав уравнения (3.9) и (3.10), получаем [1, 2]:

$$\frac{\varphi_A}{\varphi_S} = \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_A - \rho_L} = AVI \quad (3.11)$$

В работе 1969 г. Джавахери и Дика отношение объемной концентрации кластеров к объемной концентрации сухого вещества называется AVI (Aggregate Volume Index) или совокупный индекс физического объема. Индекс является мерой количества воды, связанной с твердыми частицами в агрегатных образованиях и может иметь значения равное или больше 1. Подставляя значение объемной концентрации кластера в уравнение (3.8) и значение индек-

са стесненного осаждения $n = 4.65$ (таблица 3.1) для суспензий и кластеров сферической формы, получаем [1, 2]:

$$U_S^{4.65} = U_{S\infty}^{4.65} - (U_{S\infty}^{4.65} AVI) \varphi_S \quad (3.12)$$

При построении зависимости левой части уравнения (3.12) от объемной концентрации сухих твердых частиц в суспензии должно наблюдаться линейное отклонение. Угол наклона прямой при пересечении в $\varphi_S = 0$ дает значение индекса и скорость свободного осаждения. Используя значение скорости свободного осаждения можно рассчитать диаметр частицы при бесконечном разбавлении. Если начальный участок кривой не является линейным, оба указанных параметра могут рассчитываться по касательной к кривой при любой выбранной концентрации.

В своих работах 1979 г. Фитч подчеркивает, что уравнения (3.8) и (3.12) могут применяться только тогда, когда фактические данные находятся вне зоны уплотнения: в действительности, уравнение Ричардсона и Заки не учитывает множество факторов, возникающих при уплотнении [1, 2].

Майкл и Болджер в 1962 г. высказали предположение о существовании прослойки жидкости вокруг каждой флокулы в суспензии. Предсказать или вычислить толщину этой прослойки достаточно трудно. Количество жидкости зависит от степени концентрации флокул, а также скорости их осаждения. Чем более сложной является форма агрегатного образования (форма флокулы), тем большим является значение индекса, что, в свою очередь, предполагает наличие большего количества жидкости [1, 2].

Этот внешний слой жидкости не следует путать с жидкостью, находящейся в каждом сгустке. Количество такой жидкости также является важной переменной, а ее расчет – важным параметром для оптимизации процесса осаждения, как писал Ноук в 1986 г. [1, 2].

Фонт и другие в 1992 г. предложили использовать полиномиальные вариации совокупного индекса физического объема при объемной концентрации сухого вещества, как указано в уравнении [1, 2]:

$$AVI = \chi_1 + \chi_2 \varphi_S + \chi_3 \varphi_S^2 \quad (3.13)$$

Путем преобразования уравнения (3.8) подстановкой уравнения (3.13) и фиксацией значения n можно рассчитать более точные значения χ_1 , χ_2 и χ_3 , а также значение скорости свободного осаждения. Штайноур в трудах 1944 г. предложил использовать уравнение, в котором также учитывалось наличие слоя жидкости [1, 2]:

$$U_S = U_{S\infty} \frac{(\varepsilon - w_i)^3}{(1 - w_i)^2 (1 - \varepsilon)} \vartheta(\varepsilon) \quad (3.14)$$

где $\vartheta(\varepsilon)$ – это функция формы, которая зависит от пористости, а w_i – безразмерная постоянная количества жидкости, которая остается с частицей при осаждении и определяется как [1, 2]:

$$w_i = \frac{q}{1+q} \quad (3.15)$$

где q – количество жидкости на единицу общего объема твердых частиц.

Чем больше величина агрегатного образования, тем выше значение w_i . Значение $w_i = 0$ означает отсутствие агрегатных образований. Существует множество споров о том, «обволакивает» жидкость частицы или «застаивается» вокруг них, течет жидкость «через» частицы или «над» ними, но вопрос по данной тематике остается актуальным.

3.1.3 Уравнение Ричардсона и Заки. Индекс стесненного осаждения

Уравнение Ричардсона и Заки описывается уравнениями (3.6) и (3.8), где индекс n — эмпирический параметр, который зависит от конкретной частицы, числа Рейнольдса и отношения диаметра частицы (d) к диаметру аппарата (D), известного как λ . В таблицах 3.1 и 3.2 представлены различные значения индекса n без учета и с учетом граничного эффекта соответственно (влияние стенок аппарата).

Согласно информации из источников [62, 63, 64] индекс Ричардсона и Заки был модифицирован Ханом и Ричардсоном в 1989 г. (3.16). В формуле использовано число Галилео (Ga), которое, в отличие от числа Рейнольдса (Re),

выражающего предельную скорость осаждения частиц, непосредственно связано как со свойствами частиц, так и со свойствами жидкости:

$$\frac{4.8-n}{n-2.4} = 0.043Ga^{0.57} \left[1 - 1.24 \left(\frac{d}{D} \right)^{0.27} \right] \quad (3.16)$$

Таблица 3.1. Значение индекса Ричардсона - Заки без учета эффекта стенки [60, 3]

Значение числа Re	Значение индекса n без учета эффекта стенки
$Re < 0,2$	4,65
$0,2 < Re < 1$	$4,35 Re^{-0,03}$
$1 < Re < 500$	$4,45 Re^{-0,10}$
$500 < Re$	2,39

Таблица 3.2. Значение индекса Ричардсона - Заки с учетом эффекта стенки [61]

Значение числа Re	Значение индекса n с учетом эффекта стенки
$Re < 0,2$	$4,65 + 19,5 \left(\frac{d}{D} \right)$
$0,2 < Re < 1$	$(4,35 + 17,5 \left(\frac{d}{D} \right)) Re^{-0,03}$
$1 < Re < 500$	$(4,45 + 18 \left(\frac{d}{D} \right)) Re^{-0,10}$
$500 < Re$	2,39

Некоторые исследователи сконцентрировались на изучении эффекта равномерной концентрации частиц при определении скорости осаждения частиц в суспензии и обнаружили, что с увеличением концентрации частиц скорость осаждения уменьшается [65, 66]. В 1979 г. Чонг и др. использовали предметы различной формы: сферические стеклянные бусины, кристаллы в форме куба, пластиковые гранулы, кристаллы сахара правильной формы и ангулярные кристаллы различных минералов для изучения влияния отношения размера частиц к размеру стенок аппарата, что актуально для лабораторных экспериментов. Было установлено, что уравнение Ричардсона и Заки (3.8) коррелирует с кон-

стантой скорости осаждения частиц различных форм и размеров, диапазон пустотности при этом равен 0.65 – 0.9, а влияние граничного эффекта (эффекта стенки) оказалось ниже, чем было предсказано Ричардсоном и Заки [67].

Бэлдок и другие в 2004 г. использовали высококонцентрированный искусственный и природный песок для определения скорости его осаждения и сравнили это значение со значением, полученным с помощью уравнения Ричардсона-Заки. Целью их исследования была разработка простого метода для получения соответствующего значения индекса n , который можно было бы применить к природному морскому или речному песку. В конечном итоге они пришли к выводу, что при высокой концентрации осадка скорость осаждения уменьшалась до скорости стесненного осаждения отдельных мелких фракций. Скорость стесненного осаждения может быть вычислена при помощи уравнения Ричардсона-Заки при известном значении индекса n для конкретного материала [68]. Исследованиями в данном направлении занимались также Томкинс и др. [69].

В другом исследовании отмечалось, что скорость осаждения остается неопределенной величиной, значение индекса n для агрегируемых частиц (частиц, характеризующихся неправильной формой, более широким диапазоном размеров и плотностей, структурным разнообразием) в значительной мере отличается от значений индекса стесненного осаждения n для не агрегируемых (не когезируемых) частиц (например, песка) [70].

3.1.4 Гелевая точка или критическая концентрация

Тесты на периодическую седиментацию являются фундаментальными экспериментами с целью разработки промышленного гравитационного оборудования. Они недороги и легко выполняются. При помощи анализа кривой осаждения можно добиться оптимальных результатов при проектировании сгустителей, о чем подробно рассказывается в работах Коу и Клевенджера, Талмейджа и Фитча [1, 2].

Основным параметром при разработке и производстве сгустителей является так называемая гелевая точка. Конча и Бюргер, Глэдмэн и др. в своих трудах описывали ее как время, за которое жидкая среда начинает приобретать каркасную структуру и образует пористый осадок на дне сосуда. В вышеуказанных тестах эта точка располагается на кривой осаждения у границы раздела между зонами осаждения и уплотнения, где твердые агрегировавшие частицы начинают формировать самостоятельную каркасную структуру. Благодаря такой каркасной структуре сила воздействия масс каждого отдельного кластера или частицы направлена вниз через всю структуру, в результате чего кластеры или частицы в образующемся осадке подвергаются воздействию силы сжатия, величина которой увеличивается в направлении ко дну сосуда за счет веса находящегося сверху вещества [1, 2].

Таким образом, гелевая точка (критическая концентрация - φ_c) является необходимым параметром для определения характера сжимаемости и структуры слоя осадка. Вычислить точку сжатия напрямую не является возможным, используются косвенные измерения.

3.1.4.1 Вычисление гелевой точки

Был выдвинут ряд теорий и математических моделей для расчета гелевой точки. Тиллер и Хатиб в 1984 г. представили метод, основанный на экспериментах по равновесному периодическому отстаиванию суспензий с различной начальной концентрацией твердых частиц. Объемную долю твердых веществ на любой глубине ($\varphi(H)$) определяли следующим образом [1, 2]:

$$\varphi(H) = \frac{\partial \varphi_c}{\partial H} \quad (3.17)$$

где φ_c -общий объем твердых частиц, находящихся ниже верхней части осадка глубиной (H) в состоянии покоя. Для того чтобы рассчитать концентрацию твердых частиц, находящихся ниже верхней части осадка, имеющего любую заданную глубину, необходимо иметь экспериментальные значения трех величин [1, 2]:

- первоначальная глубина суспензии (рабочая высота лабораторного сосуда);
- первоначальная концентрация твердых частиц в суспензии;
- высота осадка в состоянии покоя на момент расчета концентрации.

Таким образом, при помощи различных тестов и приведенных выше данных можно построить линейный график зависимости $\varphi_0 H_0$ от H_∞ . Затем гелевая точка определяется путем решения следующей системы линейных уравнений [1, 2]:

$$\varphi_0 H_0 = m' H_\infty + q' \quad (3.18)$$

$$H_\infty = 0 \quad (3.19)$$

Другим способом определения точки гелеобразования является измерение давления твердых частиц в ходе нескольких тестов. На начальном этапе тестов ниже уровня критической концентрации структуры не образуются, и они находятся в состоянии поддержки жидкостью. Таким образом, общее давление на дне осадочного слоя рассчитывается следующим образом [1, 2]:

$$P_{t=0} = \rho_T g H_0 \quad (3.20)$$

где ρ_T - плотность суспензии при первоначальной концентрации твердых частиц. Изменяя значения общей начальной глубины (H_0) и/или первоначальной концентрации твердых частиц можно получить различные значения давления, а также различные средние значения концентрации отложений. Любое конкретное значение давления соответствует определенному значению средней концентрации твердых частиц в осадке: путем построения зависимости значения давления от значения соответствующей средней концентрации можно получить верхний предел средней концентрации, ниже которого структура из твердых частиц при следующих условиях не образуется [1, 2]:

$$P_{t=0} = 0 \quad (3.21)$$

Кроме того, Крестер и др. в 2003 г., используя тот же подход, смогли определить гелевую точку путем построения следующих графиков [1, 2]:

- $P_{t=0} - H_0$, при постоянном значении φ_0 ;

- $P_{t=0} = \varphi_0$, при постоянном значении H_0 ;
- $P_{t=0} = \varphi_0 H_0$.

Однако этот подход не учитывает изменения давления жидкости, вызванные движением частиц – так называемое динамическое давление жидкости, о котором говорилось ранее. Фонт и др. в 1992 г. в исследовании, основанном главным образом на расчете некоторых параметров на основе экспериментальных данных, полученных при проведении тестов на периодическую седиментацию, предложили процедуру определения, как гелевой точки, так и точки, соответствующей границе между зонами осаждения и уплотнения в суспензиях гидрооксидов металлов. Указанная процедура состоит из двух этапов [1, 2]:

1. Расчет скорости осаждения путем определения трех последовательных точек на кривой осаждения. Приведение этих фактических данных к квадратному многочлену и, наконец, дифференцирование скорости осаждения в промежуточной точке;

2. Построение двух графиков: «высота (глубина) границы раздела зон во времени» и «скорость осаждения во времени». Определение на графиках двух точек – точки, соответствующей границе между зонами осаждения и уплотнения, и гелевой точки с учетом изменения скорости осаждения.

Практически во всех тестах на графике изменения скорости осаждения были замечены две особенности: точка, соответствующая границе между зонами осаждения и уплотнения, была расположена в месте заметного снижения скорости осаждения, а гелевая точка находилась в конце зоны, где значение скорости осаждения было почти постоянным или же наблюдались незначительное изменение скорости.

3.1.5 Сжимаемость осадка (Предел текучести при сжатии)

Опыт показал, что эффективное сжатие твердого вещества может быть выражено исключительно как функция концентрации. Единственный способ передачи момента непосредственно от частицы к частице во время осаждения – через столкновение частиц. Поэтому для концентраций твердых веществ ниже

критического уровня, где частицы в жидкости находятся во взвешенном состоянии, эффективное сжатие является константой. При концентрации, выше критической концентрации, образованная структура частиц передает силы непосредственно между частицами в осадке. Данное явление может быть охарактеризовано следующими ограничениями для эффективного сжатия твердого вещества или предела текучести при сжатии $\sigma_e(\varphi)$ [Па] [1, 59]:

$$\sigma'_e = \frac{d\sigma_e}{d\varphi} = \begin{cases} 0, & \varphi < \varphi_c \\ \geq 0, & \varphi \geq \varphi_c \end{cases} \quad (3.22)$$

Предел текучести при сжатии описывается выражениями [1, 59]:

$$\sigma_e(\varphi) = \begin{cases} \text{Const}, & \varphi < \varphi_c \\ \alpha \exp(\beta\varphi), & \varphi \geq \varphi_c \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\sigma_e(\varphi) = \begin{cases} \text{Const}, & \varphi < \varphi_c \\ \sigma_0 \left(\left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^c - 1 \right), & \varphi \geq \varphi_c \end{cases} \quad (3.24)$$

Значения параметров σ_0 и c были взяты из опубликованной ранее литературы и равняются 2 Па и 6,5 соответственно [24].

3.1.6 Взаимодействие «твердое вещество – жидкость»

Параметры, описывающие процесс сгущения являются функцией плотности потока твердых частиц $f_{bk}(\varphi)$ и эффективного сжатия твердого вещества $\sigma_e(\varphi)$. Функция плотности потока твердых частиц зависит от коэффициента сопротивления $Kc(\varphi)$ для концентраций ниже критического уровня, и от проницаемости осадка $k_{пр}(\varphi)$ для концентраций равных или больше критической концентрации. Эффективное сжатие твердого вещества $\sigma_e(\varphi)$ характеризует степень сжимаемости осадка [59].

Свойства твердого материала и жидкости, участвующих в сгущении – это свойства, описывающие седиментацию и консолидацию [59]:

- Концентрация твердого вещества в объемных долях $\varphi(z, t)$;
- Плотность потока твердых частиц $f(z, t)$;
- Конвективная скорость пульпы $q(z, t)$;

- Сила взаимодействия твердое вещество-жидкость $m_d(z, t)$;
- Избыточное давление пор $p_e(z, t)$;
- Эффективное сжатие твердого вещества $\sigma_e(z, t)$.

Данные переменные для процесса динамического сгущения в областях, где переменные непрерывные, подчиняются следующим уравнениям [1, 59]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial f(\varphi)}{\partial z} = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} = 0, q = U_s - (1 - \varphi)U_r \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial \sigma_e}{\partial z} = -\Delta \rho \varphi g + \frac{m_d}{1 - \varphi} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial p_e}{\partial z} = -\frac{m_d}{1 - \varphi} \quad (3.28)$$

где $f(\varphi) = U_s \varphi$ - функция плотности потока твердых частиц, $U_r = U_s - U_f$ - относительная скорость «твердое вещество – жидкость», m_d - динамическая сила взаимодействия «твердое вещество – жидкость» [1, 59].

3.1.6.1 Взаимодействие «твердое вещество – жидкость» при седиментации

Во время осаждения для $\varphi < \varphi_c$, хлопья медленно перемещаются через жидкость и гидродинамическая сила может быть представлена в виде линейной функции относительной скорости «твердое вещество - жидкость» [1, 59]:

$$m_d = -\mu K_c(\varphi)U_r \quad (3.29)$$

где $K_c(\varphi)$ - коэффициент сопротивления «твердое вещество – жидкость». Относительная скорость «твердое вещество – жидкость» - U_r может быть представлена следующим выражением [1, 59]:

$$U_r = -\frac{\Delta \rho \varphi g (1 - \varphi)}{\mu K_c(\varphi)} \quad (3.30)$$

Подставляем v_r в уравнение (3.26), рассчитываем v_s и, умножив на φ , получаем функцию плотности потока Кинча $f_k(\varphi)$ для непрерывного процесса [1, 59]:

$$f_k = q\varphi - \frac{\Delta \rho \varphi^2 (1 - \varphi)^2 g}{\mu K_c(\varphi)} \quad (3.31)$$

Функция потока Кинча для периодического процесса $f_{bk}(\varphi)$ равна [1, 59]:

$$f_{bk}(\varphi) = -\frac{\Delta\rho\varphi^2(1-\varphi)^2g}{\mu Kc(\varphi)} \quad (3.32)$$

Таким образом [1]:

$$f_k(\varphi) = f_{bk}(\varphi) + q\varphi, \quad \varphi < \varphi_c \quad (3.33)$$

Подставляя уравнение (3.33) в (3.25) получаем [1]:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(f_{bk}(\varphi) + q\varphi) = 0, \quad \varphi < \varphi_c \quad (3.34)$$

Уравнение (3.34) описывает процесс осаждения частиц в суспензии с концентрацией меньше критической $\varphi < \varphi_c$. Его можно идентифицировать как уравнение Кинча для непрерывной седиментации идеальной суспензии [59].

3.1.6.2 Взаимодействие «твердое вещество - жидкость» при консолидации

Во время консолидации, жидкость движется медленно, хотя порозный пласт, образующий осадок и может быть определен количественно с помощью проницаемости слоя и вязкости жидкости. Для медленного движения ньютоновской жидкости через сжимаемый порозный слой справедливо уравнение Дарси [1]:

$$m_d = -\frac{\mu}{k_{пр}(\varphi)}(1-\varphi)^2U_r \quad (3.35)$$

где $k_{пр}(\varphi)$ и μ - проницаемость осадка и вязкость жидкости соответственно. Следовательно, относительная скорость «твердое вещество – жидкость» равна [1, 59]:

$$U_r = -\frac{k_{пр}(\varphi)}{\mu} \times \frac{\Delta\rho\varphi g}{(1-\varphi)} \left(1 + \frac{\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g} \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right), \quad \varphi \geq \varphi_c \quad (3.36)$$

Функция плотности потока Кинча $f_k(\varphi)$, для непрерывного процесса представлена ниже [1, 59]:

$$f_k(\varphi) = q\varphi - \frac{k_{пр}(\varphi)}{\mu} \times \frac{\Delta\rho\varphi^2g}{(1-\varphi)} \left(1 + \frac{\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g} \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right), \quad \varphi \geq \varphi_c \quad (3.37)$$

Функция плотности потока Кинча $f_{bk}(\varphi)$ для периодического процесса $f_{bk}(\varphi)$, для $\varphi \geq \varphi_c$, определяется как [1, 59]:

$$f_{bk}(\varphi) = -\frac{k_{пр}(\varphi)}{\mu} \times \frac{\Delta\rho\varphi^2 g}{(1-\varphi)}, \quad \varphi \geq \varphi_c \quad (3.38)$$

расширенной функции плотности потока твердых частиц Кинча для всех значений φ [1, 59]:

$$f_{bk}(\varphi) = \begin{cases} -\frac{\Delta\rho\varphi^2(1-\varphi)^2 g}{\mu Kc(\varphi)}, & \varphi < \varphi_c \\ \frac{k_{пр}(\varphi)}{\mu} \Delta\rho\varphi^2 g, & \varphi \geq \varphi_c \end{cases} \quad (3.39)$$

Функция плотности потока твердых частиц для всего диапазона концентраций равна [1, 59]:

$$f = q\varphi + f_{bk}(\varphi) \left(1 + \frac{\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g}\right) \frac{\partial\varphi}{\partial z}, \quad 0 < \varphi < 1 \quad (3.40)$$

3.2 Модель сгустителя - осветлителя

Традиционные сгустители имеют две секции с разными областями, цилиндр сверху и конус на дне для облегчения сброса нижнего продукта и для дополнительного эффекта уплотнения. При моделировании реального сгустителя часто игнорируются эти факты и предполагается постоянное поперечное сечение. С практической точки зрения подобные модели не подходят для моделирования высокоскоростных сгустителей, сгустителей, питаемых на уровне ниже уровня осадка (взвешенный осадок), т.к. модель не допускает подъема суспензии над уровнем подачи. Описание модели сгустителя подробно описано в трудах 1995-2003 г.г. Диеля, Бюргера и соавторов.

Сгуститель как сосуд можно разделить на две зоны: $z \geq z_F$, где твердые частицы могут течь вверх и $z \leq z_F$, где твердые частицы могут течь вниз. $z = z_F$ – уровень подачи, $z = 0$ – уровень нижнего продукта, $z = z_C$ – уровень поверхности осадка и $z = z_O$ - уровень перетока осветленной жидкости (рисунок 3.1) [59].

Скорость подачи пульпы и твердого вещества вводятся как сингулярные поверхностные источники прочности $Q_F(t)$ и $Q_F(t)\varphi_F(t)$ при $z = z_F$. Объем потока нижнего продукта пульпы и твердого вещества, $Q_D(t)$ и $Q_D(t)\varphi_D(t)$ соответственно. $Q_O(t)$ и $Q_O(t)\varphi_O(t)$ представляют собой объем перетока жидкости и объем перетока твердого вещества при $z = z_O$, с $Q_i > 0$; с $i = F, D, O$ [1, 59].

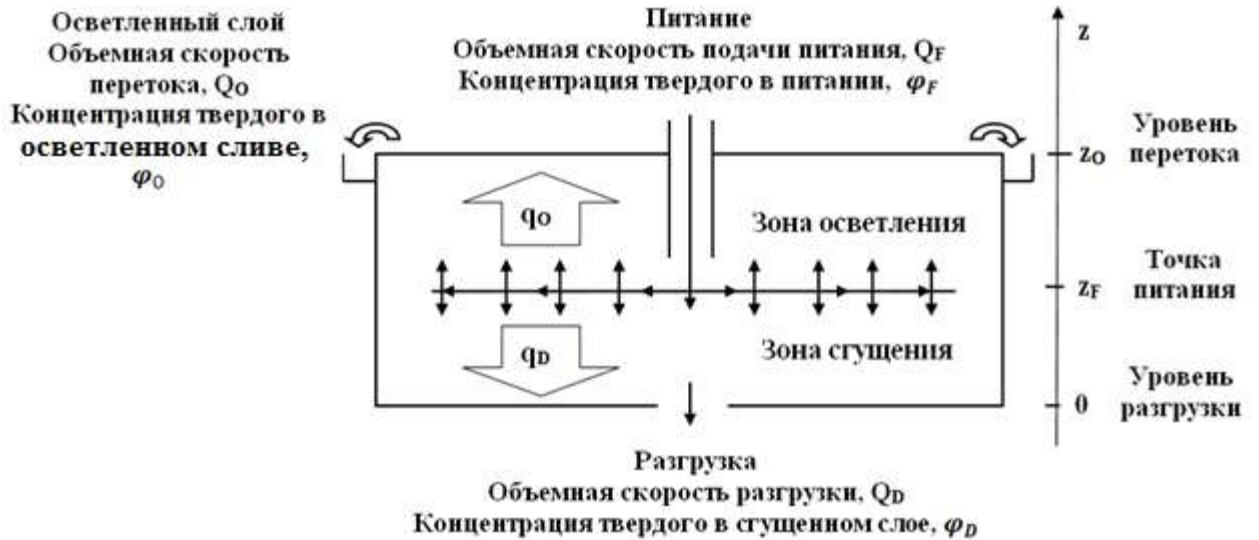


Рисунок 3.1 – Схематичный вид сгустителя – осветлителя с постоянной площадью сечения [1, 59]

Макроскопические массовые балансы [1,59]:

$$Q_F(t) = Q_D(t) + Q_O(t) \quad (3.41)$$

$$Q_F(t)\varphi_F(t) = Q_D(t)\varphi_D(t) + Q_O(t)\varphi_O(t) \quad (3.42)$$

Пространственные скорости [1, 59]:

$$q_F = -\frac{Q_F}{S}, q_D = -\frac{Q_D}{S}, q_O = -\frac{Q_O}{S} \quad (3.43)$$

$$q_F(t) = q_D(t) - q_O(t) \quad (3.44)$$

Плотность потока твердых частиц $f_k(z, t, \varphi)$ для обеих зон, включая сингулярную поверхность $q_F(t)\varphi_F(t)$ [1, 59]:

$$f_k(z, t, \varphi) = \begin{cases} q_O(t)(\varphi - \varphi_F) & \text{для } z \geq z_0 \\ q_O(t)(\varphi - \varphi_F) + f_{bk}(\varphi) & \text{для } z_0 > z > z_F \\ q_D(t)(\varphi - \varphi_F) + f_{bk}(\varphi) & \text{для } z_F \geq z > 0 \\ q_D(t)(\varphi - \varphi_F) & \text{для } z \leq 0 \end{cases} \quad (3.45)$$

Процесс осаждения можно описать следующим уравнением [1, 59]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(q\varphi + f_{bk}(\varphi) \left(1 + \frac{\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g} \right) \right) = 0, 0 < \varphi < 1 \quad (3.46)$$

Выражение (1.21) может быть представлено как вырожденное параболическое уравнение в частных производных [1, 59]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (q\varphi + f_{bk}(\varphi)) = \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{f_{bk}(\varphi)\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right), 0 < \varphi < 1 \quad (3.47)$$

При $\varphi < \varphi_c$, $\sigma_e(\varphi) = 0$ формула становится гиперболической [1, 59]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (q\varphi + f_{bk}(\varphi)) = 0, \varphi < \varphi_c \quad (3.48)$$

Для флокулируемых суспензий уравнение Кинча действует для зон, с концентрацией меньшей, чем критическая концентрация.

Начально-краевая задача решается численно с помощью метода конечных разностей, описанного Bürger and Concha в 1998 г. Уравнения решаются численно для каждого временного шага неявным методом конечных разностей типа «upwind» с экстраполяцией, в котором условия стабильности «upwind» дискретизации выражены состоянием Куранта-Фридрихса-Леви (CFL) [2, 59].

3.3 Описание технологического процесса сгущения красного шлама

Для изучения технологического процесса сгущения и промывки КШ, выявления влияющих факторов на процесс сгущения, анализа зависимостей технологических параметров и технического состояния агрегатов передела промывки и сгущения, итоговой плотности сгущенного продукта, выходной концентрации осветленного слоя от возмущающих и управляющих воздействий, а также для проведения экспериментов и идентификации параметров модели использовались архивные производственные данные и пробы промышленного образца с передела «сгущения и промывки КШ».

Геометрические характеристики сгустителей, применяющихся на переделе «Сгущение и промывка КШ», представлены в Главе 2, Раздел 2.1. Технологическая схема процесса представлена на рисунке 3.2.

Ветка сгущения КШ на исследуемом переделе представлена семью сгустителями, из которых в работе находятся пять.

Подача питания в аппараты сгущения осуществляется вручную регулированием задвижки. На линиях подачи питания в сгустители и промыватели установлены расходомеры, байпас для проведения ремонтных работ и плановой чистки аппарата.

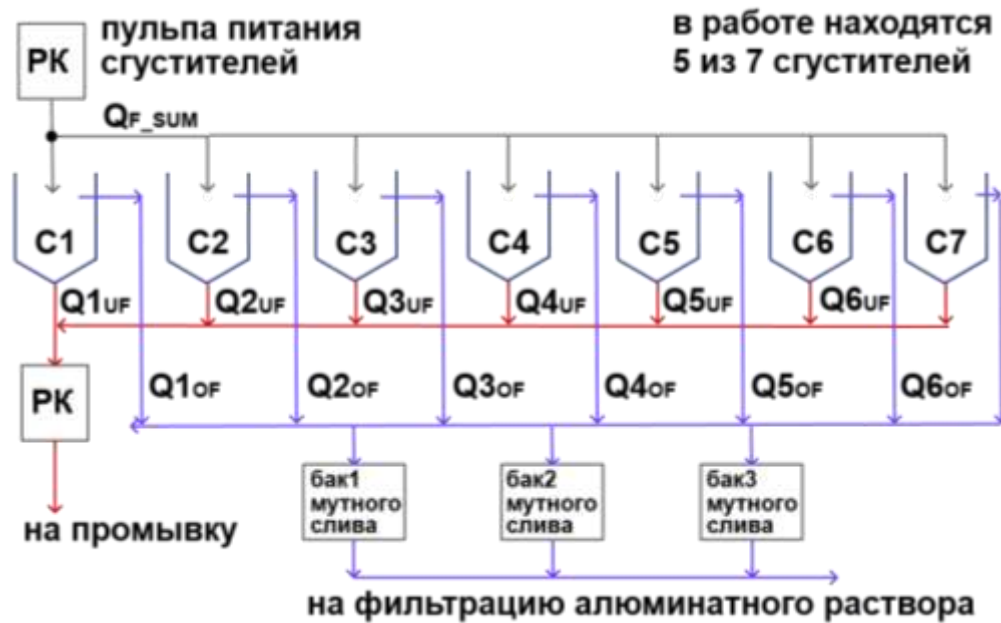


Рисунок 3.2 – Технологическая схема процесса сгущения КШ

Передел сгущения и промывки КШ представлен девятью ступенями промывки, где последние два ряда работают по принципу глубокого сгущения и выход твердой фракции из-под конуса равен 35 %.

ПК являются промежуточными емкостями на всем переделе сгущения и промывки КШ, через ПК осуществляется питание сгустителей и промывателей, шлам из-под конуса предыдущего ряда промывки подается в ПК для питания следующей ступени промывки. Также в промыватель поступает промышленная вода из промежуточных баков, в которые сливается промывной раствор с последующего ряда промывателей. После седьмой ступени промывки шлам подается на узел удаления песков, где происходит отделение песковой части размером более 6 мм на гидроциклонах (плановая чистка гидроциклонов - 1 раз/неделю на 4 ч.), что облегчает работу узла «глубокого» сгущения и транспортировки красного шлама на шламовое поле. КШ в это время направляется напрямую на восьмую ступень промывки. Разгрузка гидроциклонов происходит периодически и осуществляется на спиральный классификатор, на который подается вода для отмывки песков. Отмытые пески складываются в отвал, расположенный рядом и вывозятся автотранспортом на шламовое поле.

В случае исследуемого процесса флокулянт подается в одну точку – питающий стакан, например, на УАЗе дозирование флокулянта осуществляется в две точки – в питающий стакан и РК при этом в соотношении 50 – 50 %, хотя считается что соотношение должно быть 70 – 30 %.

С последнего ряда промывателей КШ транспортируется на шламовое поле, а подшламовая вода с поля в последствие на последнюю ступень промывки. В НС при шламовых полях контролируется концентрация твердой фракции в рецикловой подшламовой воде, например на УАЗе в следствие изменения процентного соотношения сырьевого потока на входе производственного цикла увеличились потери Al_2O_3 с КШ, при этом из-за особенностей боксита рецикловая подшламовая вода содержит высокую концентрацию твердой фракции, существуют колодцы – отстойники при шламовых полях, которые позволяют временно питать промыватели водой в моменты, когда мутность подшламовой воды непосредственно с поля выше заданного диапазона. Также на УАЗе предпринималась попытка сгущения на шламовом поле, но данный процесс имеет свои ограничения и трудности в круглогодичной реализации.

Недоукомплектованность КИПиА приводит к снижению плотности сгущенного продукта, увеличению выноса твердой фракции с верхним сливом сгустителя и, как следствие, повышению концентрации щелочи в отвальном КШ, снижению возврата щелочи и глинозема в процесс.

3.3.1 Контрольно-измерительные приборы

Расходомер флокулянта

Для дозирования флокулянта применяется кориолисовый расходомер в прочном двухкамерном корпусе, созданный на основе двухпроводной технологии, не требует входных или выходных прямых участков, электрическое подключение прибора – отдельный клеммный отсек.

Принцип измерения основан на управляемой генерации сил Кориолиса. Эти силы всегда возникают в системе, в которой одновременно присутствуют поступательное и вращательное движения. Диапазон измерения: 0-18000 кг/ч

для диаметра трубы 25 мм. Выходной сигнал 4-20 мА. Погрешность измерения по массовому расходу составляет $\pm 0.1 \%$. Объемный расход является расчетной величиной.

Расходомер пульпы шлама

Для измерения расхода питающей и сгущенной пульпы применяется электромагнитный расходомер для двунаправленного (реверсивного) измерения жидкостей с минимальной проводимостью ≥ 5 мкС/см. Применение для температур до $+180$ °С и максимального давления 40 бар. Диапазон измерения: 0-9600 м³/ч. Выходной сигнал 4-20 мА. Погрешность измерения по объемному расходу $\pm 0.2 \%$.

Преобразователь уровня раздела фаз

Для бесконтактного измерения уровня раздела фаз применяется радиометрический преобразователь. Диапазон измерений одного преобразователя до 2 м. Диапазон измерений расширяется за счет каскадной установки нескольких приборов. Применяется для любых значений рабочих температур и давлений.

Преобразователь концентрации твердой фракции

Для измерения концентрации твердой фракции в КШ источник гамма-излучения и преобразователь устанавливаются на противоположных сторонах измерительной трубы. Преобразователь рассчитывает концентрацию среды, исходя из интенсивности полученной радиации. При подключении дополнительного датчика температуры возможно учитывать температурное расширение среды. Диапазон измерения: 0-0.1 об.долей. Выходной сигнал 4-20 мА. Погрешность измерения $\pm 1 \%$.

Также основные характеристики пульпы определяют методами лабораторного анализа с дискретностью 1 раз в 8 ч.

Преобразователь массы сгущенного слоя

Измерение высоты постели сгущенного продукта КШ, например, поплавковым уровнемером, не эффективно, т.к. плотность осадка в зоне консолидации и в зоне стесненного осаждения может сильно колебаться при не правильном

управлении. Но, тем не менее, датчики уровня постели поплавкового типа широко применяются при контроле степени флокуляции в контуре при управлении производительностью насоса, подающего флокулянт.

Датчик давления постели, установленный в разгрузочном конусе сгустителя, позволяет измерять косвенно массу сгущенного слоя.

Применение для температур до +250 °С без разделительной диафрагмы, от 70 до 400 °С – с разделительной диафрагмой. Диапазон измерения давления : 0-400 бар. Выходной сигнал 4-20 мА, где сигнал в 4 мА – чистый алюминатный раствор, 20 мА – сгущенный продукт на определенной высоте. В СУ используется для регулирования производительностью насоса, откачивающего сгущенный продукт. Погрешность измерения $\pm 0.15 \%$.

Датчик тока

На ОУ обеспечено три уровня защиты граблин и привода от повреждений и перегрузок: привод и система подъема грабли. Датчики тока позволяют отслеживать значение тока, потребляемого двигателем при вращении граблин. В момент повышения нагрузки на лопасти система подъема граблин безопасно поднимает их на определенную высоту.

Любой ток, протекающий по проводнику, создает вокруг этого проводника магнитное поле. Измеряя величину и направление этого магнитного поля, можно определить величину, направление и форму протекающего тока. Отсюда и основное преимущество датчиков тока, реализующих указанный принцип работы: они измеряют любой вид тока без разрыва токовой цепи и с гальванической развязкой выходного сигнала от токовой цепи. Одним и тем же прибором можно измерять постоянные, переменные и импульсные токи. Для этого в конструкцию датчика кроме концентратора магнитного поля входит так называемый датчик Холла – миниатюрный полупроводниковый прибор, определяющий величину и направление магнитного поля проходящего тока [71].

Выходной сигнал такого датчика строго пропорционален измеряемому току. Диапазон измеряемого тока 0-50 А. Диапазон рабочей температуры до 80 °С. Основная погрешность измерения не более $\pm 1 \%$.

Датчик мутности

Для измерения концентрации твердой фракции в осветленном сливе сгустителя используются мутномеры. Принцип работы мутномеров основан на пропускании светового потока через слив.

Измерение производится при помощи погружных зондов (первичных преобразователей), устанавливаемых непосредственно в точке контроля (в верхней части чаши сгустителя или желобе сбора слива сгустителя). Система состоит из погружных зондов, вторичного преобразователя.

Измерение низкой мутности, применяемое в системе, проводится на основе нефелометрического принципа, то есть регистрации величины рассеивания инфракрасного излучения твердыми частицами пульпы под углом 90 градусов [72].

Традиционно для очистки измерительного окна погружных зондов применяется механическая очистка, представляющая собой щетку, периодически протирающую измерительное окно. Опасность использования такой системы очистки заключается в наличии в пульпе абразивных частиц, при попадании этих частиц под щетку измерительное окно может быть повреждено.

Отличительной особенностью, например, погружных зондов компании WTW (Германия) является принцип автоматической очистки окна погружного зонда за счет периодических колебаний рабочей поверхности с ультразвуковой частотой. В результате таких колебаний происходит отслоение отложений и, следовательно, очистка окна без механического воздействия на него.

Погружной зонд системы позволяет регистрировать увеличение мутности в верхних слоях сгустителя, что может наблюдаться при значительном уменьшении крупности питания операции, и своевременно реагировать, не допуская нарушения кондиции по сливу [72].

Диапазон измерений 0-1000 мг/л. Основная погрешность измерения не более $\pm 2\%$ от значения полной шкалы.

Расходомер осветленного слива

Также необходимо отметить, что одним из показателей оценки потерь твердой фракции с верхним сливом сгустителя служит объемный расход слива. Для каждого сгустителя существует максимальный расход слива, превышение которого приводит к увеличению потерь полезного компонента со шламом. Существует алгоритм контроля, при котором при достижении максимального расхода слива расходомер подает сигнал на снижение или прекращение питания сгустителя. Для контроля объемного расхода слива применяются, например, индукционные и щелевые расходомеры.

Из-за агрессивных свойств пульпы, приводящей к зарастанию стенок трубопроводов, в расходомерах с течением времени растут систематические погрешности.

3.3.2 Анализ и обработка архивных производственных данных

В таблице 3.3 перечислены входные и выходные измеряемые параметры исследуемого ОУ и дискретность измерений, которая для контролируемых, возмущающих и управляющих воздействий равна 1-2 ч. Сгуститель как объект автоматизации - инерционный объект, время инерции по некоторым каналам может быть порядка 6 – 8 ч.

Архивные производственные данные были проанализированы с помощью аналитического инструмента GE Proficy Troubleshooter [73], являющегося компонентом программной среды GE Proficy Csense, данный инструмент позволил извлечь знания из имеющихся технологических данных [74, 75, 76].

На рисунках 3.3 – 3.8 представлены статические характеристики целевого параметра «Мутность верхнего слива сгустителя» от основных измеряемых параметров.

Таблица 3.3 – Входные и выходные измеряемые параметры ОУ

№	Наименование измеряемого параметра	Дискретность измерений
1	Содержание твердой фракции в сгущенном продукте	2 ч
2	Мутность алюминатного раствора (верхнего слива)	2 ч
3	Объемный расход питающей пульпы	1 ч
4	Объемный расход сгущенного продукта	1 ч
5	Объемный расход воды на разбавление флокулянта	1 ч
6	Объемный расход флокулянта	1 ч
7	Концентрация твердого в питании	2 ч
8	Уровень постели	1 ч
9	Ток, потребляемый двигателем при вращении граблин	1 ч
10	Высота граблин	1 ч
11	Тип флокулянта	-
12	Активность флокулянта	-
13	Температура питающей пульпы	-
14	Распределение частиц по размерам в питании	-

Зависимость между целевым параметром «мутность верхнего слива» и объемным расходом питающего потока в сгуститель можно охарактеризовать как существенно нелинейную статическую характеристику (рисунок 3.3). Параметр «питание» выступает в качестве возмущающего воздействия в СУ сгустителем и может изменяться в заранее установленных пределах, т.к. скорость подачи питания в стакан сгустителя оказывает влияние на процесс флокуляции и последующий вынос недофлокулированных частиц с потоком в верхний слив аппарата. Данному вопросу посвящены работы научного центра CSIRO Minerals (Австралия) и его сотрудников по CFD моделированию, в которых рассматривается влияние скорости подачи пульпы в питающий стакан на рост

флокул/кластеров, описываемый моделью популяционного баланса [77, 78, 79, 80].

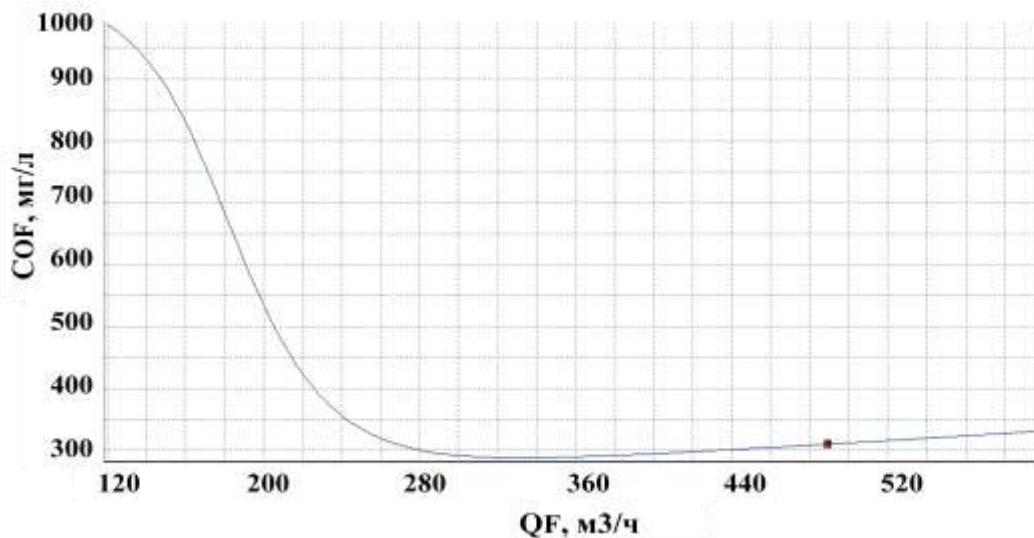


Рисунок 3.3 – Зависимость параметра «мутность алюминатного раствора» от параметра «объемный расход питающей пульпы»

Характеристическая зависимость на рисунке 3.3 отражает три основных режима подачи питающей пульпы в сгуститель:

- скорость подачи питания в стакан, а, следовательно, и скорость сдвига недостаточная для процесса флокуляции и как результат высокая мутность в верхнем сливе сгустителя;
- оптимальная для исследуемого ОУ и его геометрии скорость подачи питающей пульпы и концентрация твердой фракции в питании, при которой мутность верхнего слива колеблется в заданном технологом диапазоне;
- скорость подачи питания в стакан слишком высокая для процесса флокуляции для исследуемого ОУ. Повышение объемного расхода питающей пульпы также ведет к образованию в потоке завихрений в районе сливного желоба. Небольшая часть потока возвращается к центру сгустителя, создавая циркулирующую нагрузку. При таких потоках осадок на дне имеет максимальную толщину у стенок и минимальную к центру. Это может быть причиной зашламовывания сгустителя. Также при увеличении объемного расхода питающей

пульпы в сгуститель увеличивается поступление твердой фракции на сгущение и, как следствие, не все частицы участвуют в процессе флокуляции. Все указанные факторы приводят к повышению мутности в верхнем сливе сгустителя.

Рисунок 3.4 отражает зависимость между целевым параметром «мутность верхнего слива» и объемным расходом раствора на разбавление флокулянта. Как показывают экспериментальные исследования, описанные в главе 2, чем меньше концентрация твердого в питающей суспензии, тем выше скорость свободного осаждения, а значит меньше мутность верхнего слива сгустителя, на что указывает ниспадающая часть характеристической кривой. Но при дальнейшем разбавлении увеличивается общий объемный расход поступающей суспензии в сгуститель, что ведет к повышению мутности в сливе по причинам, описанным ранее.

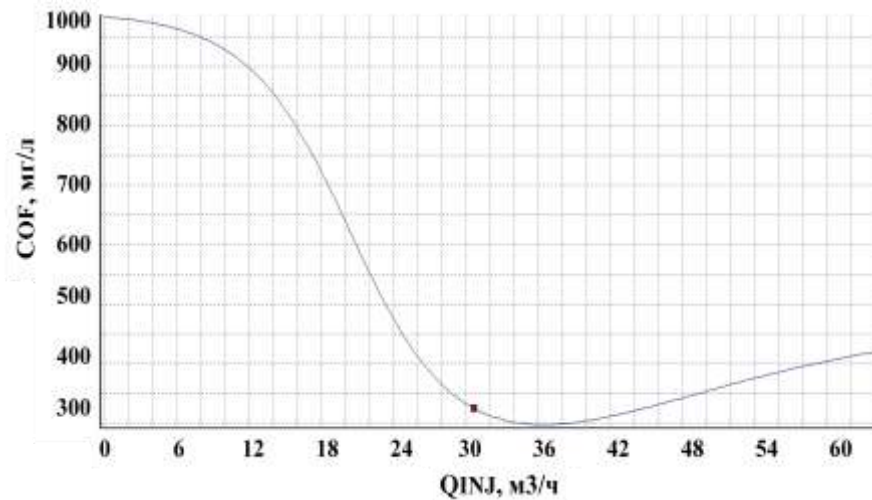


Рисунок 3.4 – Зависимость параметра «мутность алюминатного раствора» от параметра «степень разбавления флокулянта»

Характеристическую зависимость между параметрами «мутность верхнего слива» и «объемный расход сгущенного продукта» можно описать как нелинейную статическую характеристику (рисунок 3.5). Параметр объемный расход сгущенного продукта является управляющим при регулировании плотности сгущенного продукта. Для исследуемого ОУ диапазон регулирования данного

параметра для оптимального ведения процесса равен $80 - 130 \text{ м}^3/\text{ч}$. При недостаточной скорости откачки нижнего продукта, повышается уровень постели в сгустителе и плотность сгущенного продукта, но при этом увеличивается содержание твердой фазы в верхнем сливе. При увеличении скорости откачки сгущенного продукта, при которой высота постели сильно снижается, достигая нижних аварийных пределов, мутность верхнего слива также повышается, т.к. начинается «проток» пульпы через сгуститель.

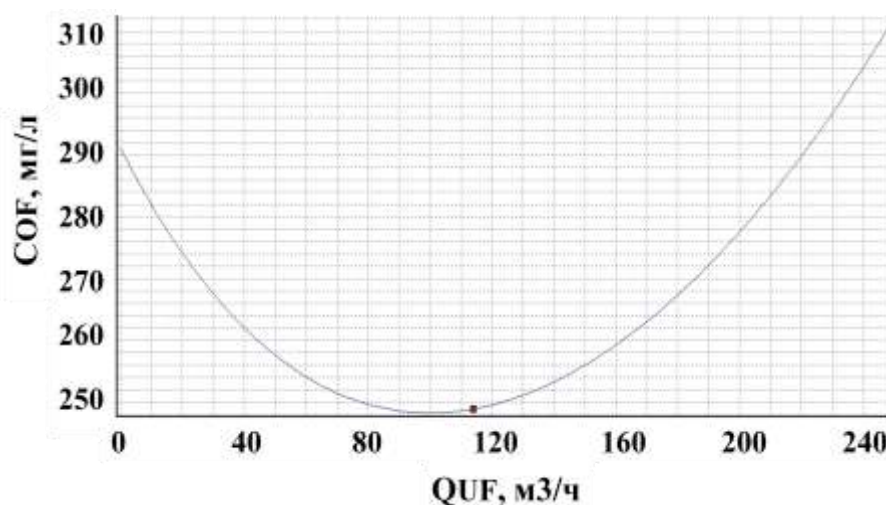


Рисунок 3.5 – Зависимость параметра «мутность алюминатного раствора» от параметра «объемный расход сгущенного продукта»

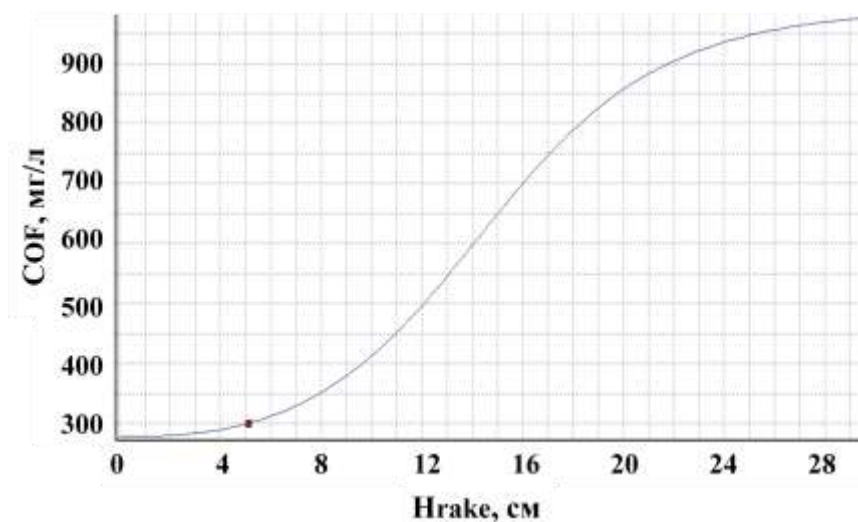


Рисунок 3.6 – Зависимость параметра «мутность алюминатного раствора» от параметра «высота граблин»

Зависимость между параметрами «мутность верхнего слива» и «высота граблин» указывает на то, что высота граблин является сигнализатором мутности верхнего слива сгустителя (рисунок 3.6).

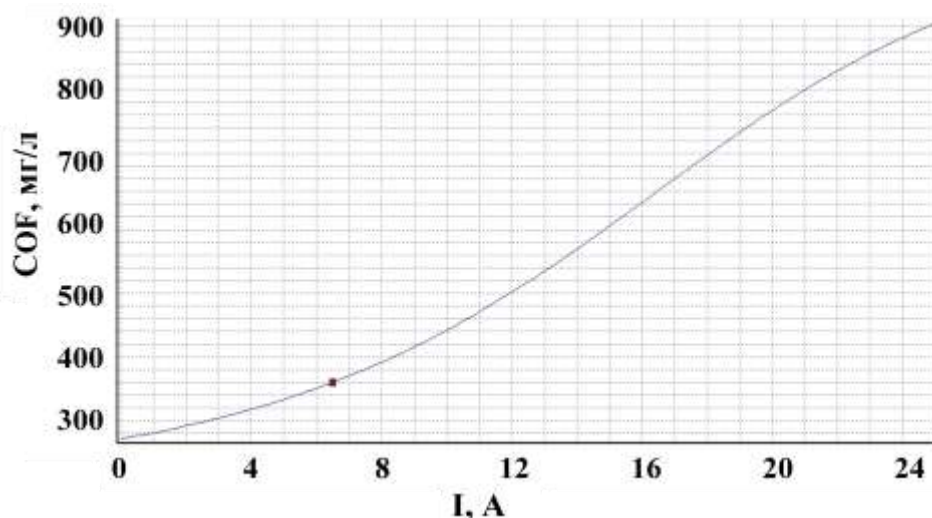


Рисунок 3.7 – Зависимость параметра «мутность алюминатного раствора» от параметра «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин»

Параметр «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин» также является сигнализатором мутности в верхнем сливе (рисунок 3.7). Таким образом, по параметрам «высота граблин» и «ток, потребляемый двигателем» можно отслеживать повышение твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

В таблице 3.4 представлены результаты корреляционного анализа измеряемых параметров исследуемого ОУ.

Значительное количество выходных показателей сильно коррелированы между собой. Целевой параметр «мутность верхнего слива» имеет тесную корреляцию с большинством измеряемых параметров. Точное измерение всех величин затруднительно. Например, плотность верхнего слива измеряют неточно в связи с низкой плотностью, измерение высоты сгущенного слоя затруднено из-за отсутствия четкой границы между зонами. Все это приводит к различным, порой упрощенным вариантам управления сгустителями.

Таблица 3.4 – Результаты корреляционного анализа параметров

	Об.расход питающей пульпы	Степень разбавления флокулянта	Высота постели	Мутность верхнего слива	Высота граблин	Ток, по- требляемый двигателем при враще- нии граблин	Об.расход сгущенного продукта
Об.расход питающей пульпы	100	74.29	14.37	55.73	-55.25	83.08	60.20
Степень разбавления флокулянта	74.29	100	21.69	51.43	-47.22	67.21	45.28
Высота постели	14.37	21.69	100	54.61	-38.81	23.79	1.85
Мутность верхнего слива	55.73	51.43	54.61	100	-50.11	58.26	31.37
Высота граблин	-55.25	-47.22	-38.81	-50.11	100	-55.96	-25.69
Ток, по- требляемый двигателем при враще- нии граблин	83.08	67.21	23.79	58.26	-55.96	100	56.59
Об.расход сгущенного продукта	60.20	45.28	1.85	31.37	-25.69	56.59	100

3.4 Модель зоны флокуляции

Модель процесса флокуляции питающей суспензии позволяет рассчиты-
вать средний размер флокул, D_{floc} , мкм, в зависимости от объемного расхода
флокулянта (Q_{floc}) и его разбавления. Зависимость установлена по результатам
численных экспериментов в программе «Excel Population Balance Model» [79],
разработанной в ходе проекта «AMIRA p266 project: Improving thickening
technology», спонсором которого является компания РУСАЛ [81]. В основе
программы [79] лежит уравнение баланса и динамики популяций – уравнение
популяционного баланса (PBE - Population Balance Equation).

Полученная зависимость носит следующий вид (3.49):

$$D_{floc} = k \cdot (840.2 + 0.701Q_{floc} - 250.7\varphi_0 - 0.00019Q_{floc}^2 - 0.081Q_{floc} \cdot \varphi_0 + 22.8\varphi_0^2) \quad (3.49)$$

где k – коэффициент сферичности флокулы.

Ход работы и результат подробно описаны в работе [24].

Модель оценивалась на адекватность по соответствию значений выходных переменных, рассчитанных с помощью созданной математической модели, и значений выходных переменных, имевших место в ходе численного эксперимента. В качестве показателя точности, по которому оценивалась данное соответствие, использовалось СКО [24].

Таким образом, скорость Стокса в обобщенной модели не является константой, а изменяется в зависимости от диаметра флокулы по формуле:

$$U_{s\infty} = \frac{D_{floc}^2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_f)}{18 \cdot \mu} \quad (3.50)$$

3.4.1 Популяционный баланс

Баланс и динамика популяций описываются системой ИДУ, которые определяют рост и распад популяций или кластеров/флокул.

Распределение частиц по размерам (PSD) определяется двумя основными процессами: флокуляцией частиц (агрегация) и последующей возможной дефлокуляцией (распад) кластеров/флокул (рисунок 3.8).

Для модели баланса популяций необходимо задавать начальное распределение частиц по крупности. В качестве начального распределения использовались данные гранулометрического состава, полученные в ходе экспериментального исследования и описанные во второй главе работы. Необходимо отметить, что модель баланса популяций имеет интервалы размеров каналов (дискретизацию). Интервалы крупности много грубее, чем те, которые были получены в процессе эксперимента с целью определения диапазонов частиц в питающей пульпе.

Дискретизация модели баланса популяций имеет вид:

$$\frac{V_i}{V_{i+1}} = 2 \quad (3.51)$$

где V_i – масс-эквивалентный объем агломерата в секции i т.е. объем полностью образовавшегося агломерата который содержит в себе $x_i = 2^{i-1}$ сферических монодисперсных частиц диаметра d_p :

$$V_i = \frac{\pi}{6} d_i^3 = x_i v_p = x_i \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad (3.52)$$

В модели баланса популяций использовать 40 каналов.

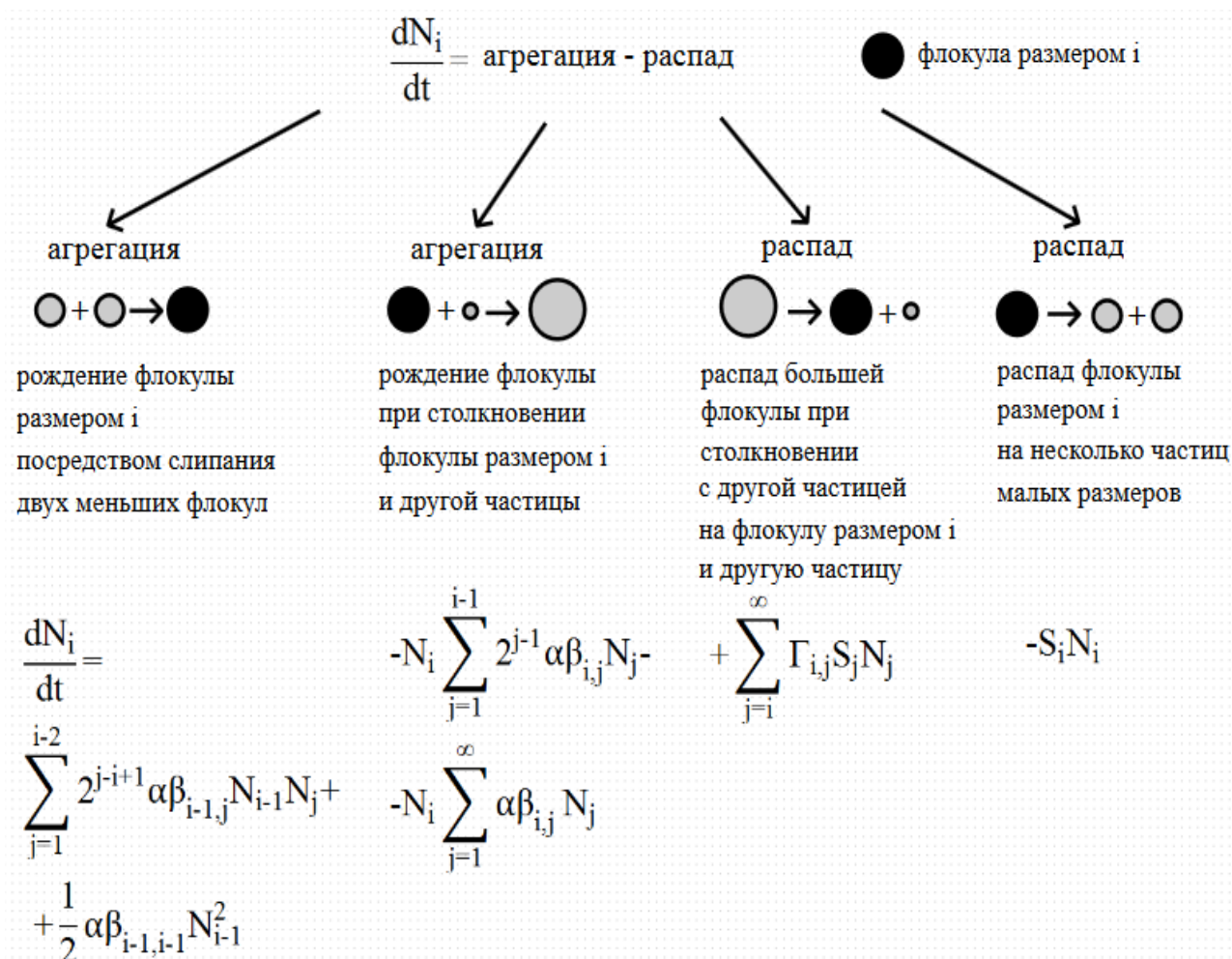


Рисунок 3.8 – Динамика популяций

где N_i – число частиц i -го размера в пульпе, $\beta_{i,j}$ – вероятность слипания частиц i -го и j -го размеров при образовании флокул, S_i – вероятность распада частиц, $\Gamma_{i,j}$ – функция распределения распада частиц (рисунки 3.9 - 3.11).



Рисунок 3.9 – Адсорбция флокулянта на поверхности частиц в процессе перемешивания

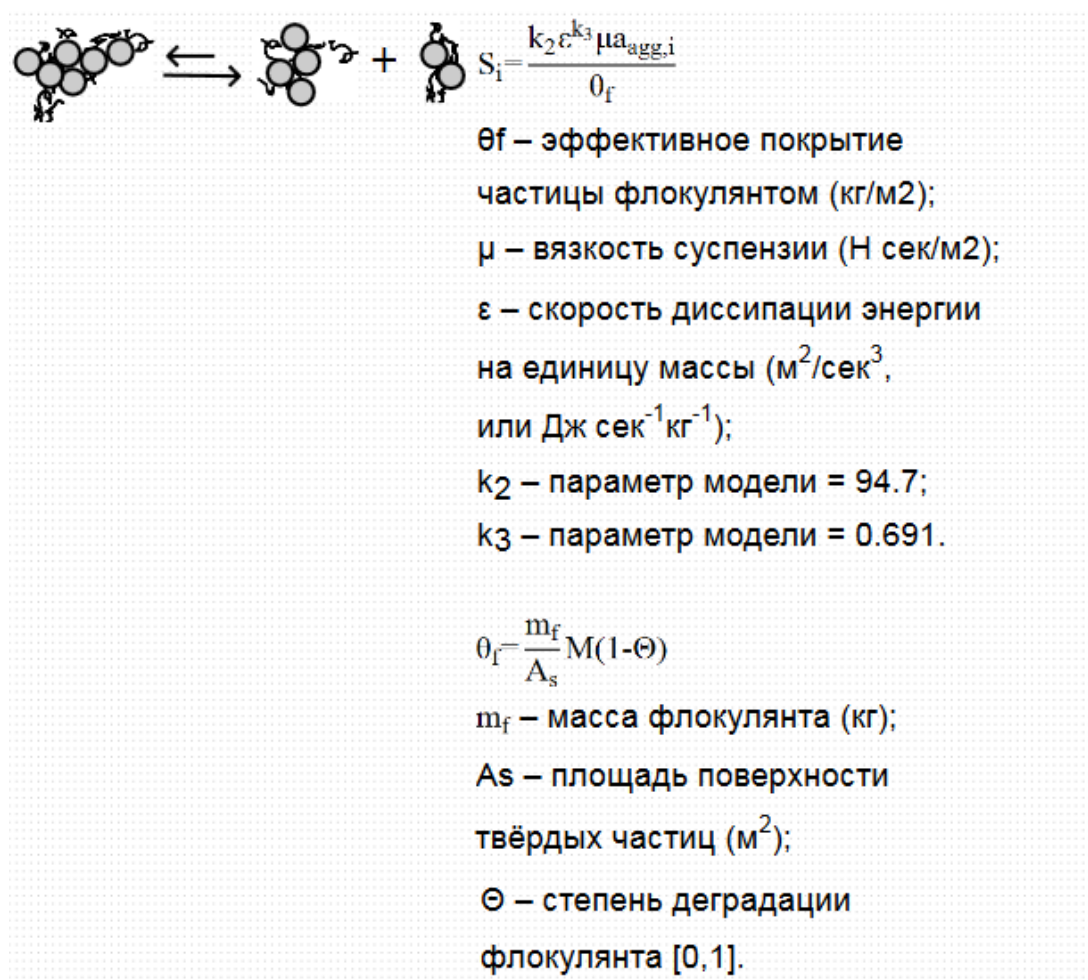


Рисунок 3.10 – Образование кластеров/флокул в процессе распада флокул большего размера

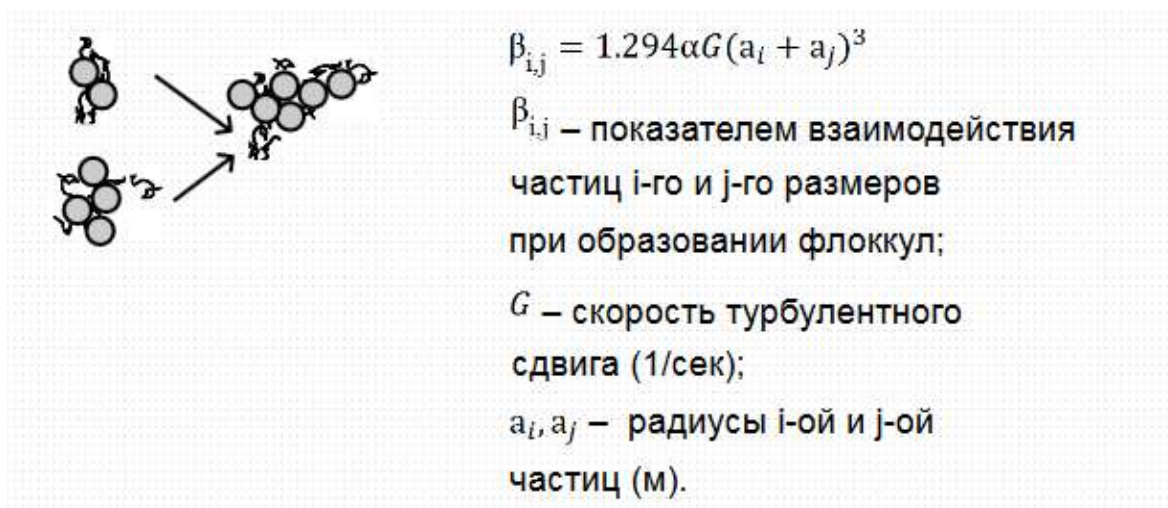


Рисунок 3.11 – Образование более крупных кластеров/флокул из флокул и частиц меньшего размера

3.5 Модель зоны осаждения

Стационарное состояние сгустителя можно представить как [2, 59]:

$$\frac{d}{dz} (q\varphi + f_{bk}(\varphi)) = \frac{d}{dz} \left(-\frac{f_{bk}(\varphi)\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g} \frac{d\varphi}{dz} \right), \quad 0 < \varphi < 1 \quad (3.53)$$

$$q\varphi + f_{bk}(\varphi) = -\frac{f_{bk}(\varphi)\sigma'_e(\varphi)}{\Delta\rho\varphi g} \frac{d\varphi}{dz} + Kc \quad (3.54)$$

Профиль концентраций в зоне консолидации может быть представлен как:

$$\frac{d\varphi}{dz} = -\frac{\Delta\rho\varphi g}{f_{bk}(\varphi)\sigma'_e(\varphi)} (q\varphi + f_{bk}(\varphi) - q\varphi_D) \quad (3.55)$$

При $z = 0$, $\varphi = \varphi_D = \varphi_{UF}$.

Таким образом, для зоны осаждения справедливо неравенство:

$$q\varphi + f_{bk}(\varphi) \leq f_f, \quad \text{где } f_f = \frac{Q_f\varphi_f}{A} \quad (3.56)$$

Стационарное состояние в зоне разгрузки может быть описано концентрацией $\varphi_D = \varphi_{UF}$. Расчет профиля концентрации начинается с фиксированной концентрации φ_D разгрузки. ДУ решается в направлении уменьшения глубины при условии, что $\varphi_D > \varphi_c$, т.к. иначе процесс моделируется как стесненное осаждение с постоянной концентрацией во всех зонах.

3.5.1 Алгоритм решения модели

Модель решена с помощью алгоритма, разработанного в программном продукте MatLab (рисунок 3.12) [59, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88].

Параметры, характеризующие состояние технологического процесса, и геометрические особенности аппарата [59]:

H – общая высота сгустителя – 2.35 м;

H_{cylinder} – высота цилиндрической части сгустителя – 1 м;

H_{cone} – высота конической части сгустителя – 1.35 м;

D – диаметр цилиндрической части сгустителя – 30 м;

φ_0 – начальная концентрация твердого вещества в объемных долях – 0.0159 - 0.02;

φ_c – критическая концентрация или гелевая точка в объемных долях – 0.028;

ρ_s – плотность твердой фракции в питающей пульпе – 3200 кг/м³;

ρ_f – плотность жидкой фазы – 1240 кг/м³;

μ – вязкость суспензии при рабочей температуре – 0.0021 Па·с;

$U_{s\infty}$ – скорость Стокса – 0.013 м/с;

n – индекс стесненного осаждения – 89.39;

σ_0, c – эмпирические коэффициенты, характеризующие предел текучести при сжатии осадка – 2 Па и 6.5 соответственно.

Для решения ДУ для расчета профиля концентрации на уровне ниже питающего стакана применяется решатель ode15s, реализованный на методе Гира – многошаговом методе переменного порядка, построенного на основе формул дифференцирования назад [82, 83]. Коэффициенты зависят от порядка формулы. В методе Гира эти формулы реализованы с помощью вектора Нордсика, позволяющего использовать эффективный алгоритм автоматического изменения порядка и величины шага [59, 89].

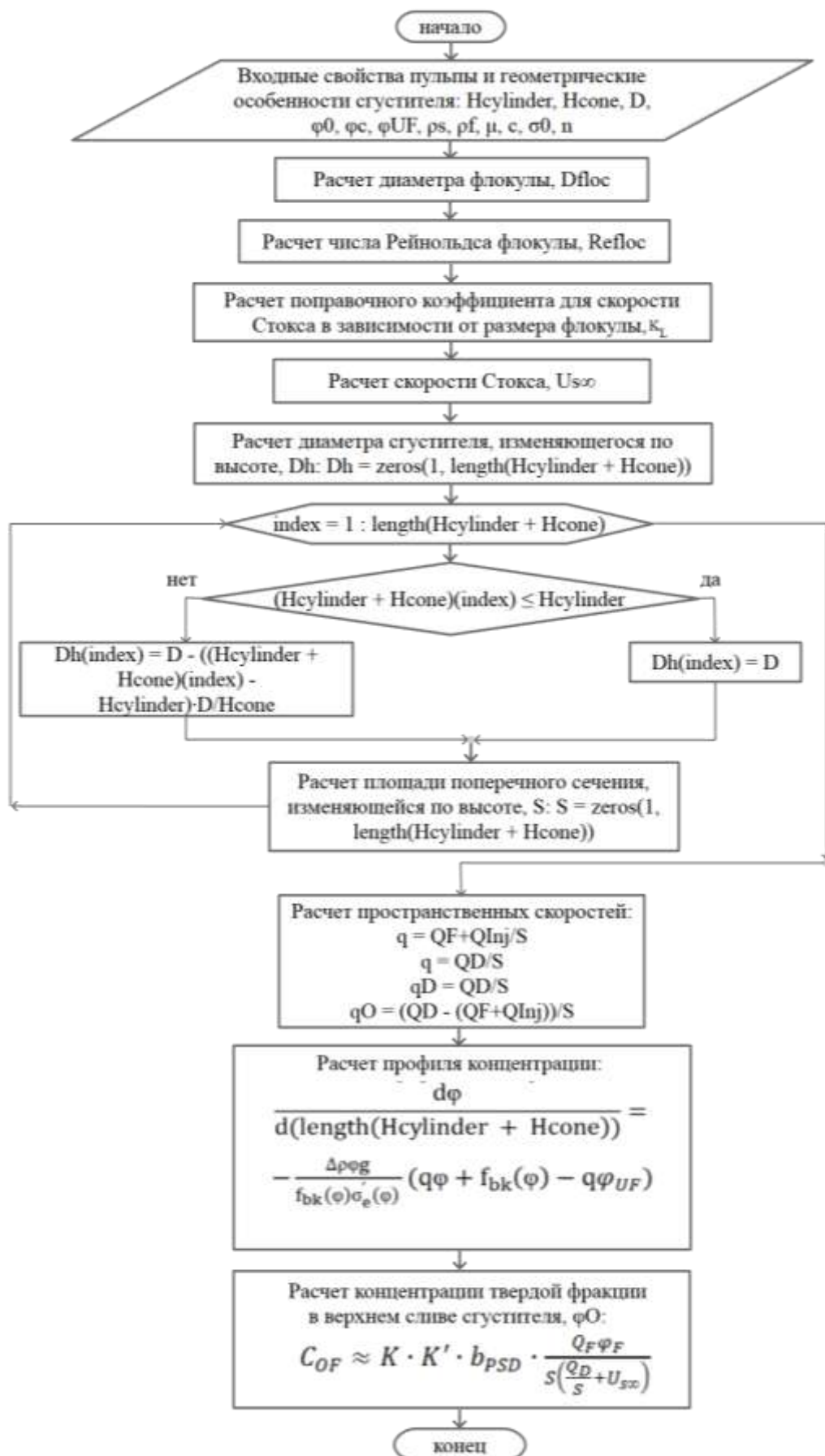


Рисунок 3.12 – Блок диаграмма алгоритма решения модели

Разработанная модель стесненного осаждения (приложение А) [90]:

1. включает в себя модель зоны стесненного осаждения и уплотнения осадка. Задача одномерного моделирования процесса осаждения твердой фракции, флокулированной суспензии в сгустителе – осветлителе, основанного на функциях проницаемости (стесненного осаждения) и эффективного сжатия твердого осадка, описывается строго вырожденным диффузионным уравнением с разрывами потока [90];

2. включает в себя модель процесса флокуляции питающей суспензии, описанной в третьей главе, в разделах 3.4, 3.4.1 [90];

3. содержит поправочный коэффициент Лепле (K_L) для расчета скорости Стокса. Изучая скорость скольжения – скорость движения среды относительно частицы, Харриотту выдвинул идею расчета минимального значения коэффициента по скорости скольжения, которая взята в виде предельной скорости движения частицы. Указанную скорость используют затем для расчета числа Рейнольдса, по которому из корреляционных соотношений, выведенных для данных по массоотдаче к неподвижным сферическим частицам, находят поправочный коэффициент с помощью модифицированного уравнения Фросслинга. Предельную скорость рассчитывали по коэффициентам лобового сопротивления, установленным для сферических частиц. Лепле в справочнике Перри [91] предлагает умножать рассчитанную скорость, применяя закон Стокса, на поправочный коэффициент [92]. В работе Т. Шервуда [92] приводятся данные соотношения поправочного коэффициента K_L и рассчитанного числа Рейнольдса (таблица 3.5) [59, 90].

Таблица 3.5 – Данные соотношения поправочного коэффициента K_L для скорости Стокса и рассчитанного числа Рейнольдса флокулы [92]

Re	1	0	100	1000	10 000	100 000
K_L	0,9	0,65	0,37	0,17	0,07	0,023

4. позволяет учитывать влияние формы образующегося в процессе флокуляции кластера (флокулы) на профиль концентрации в аппарате. В реальных условиях частицы, участвующие в процессе осаждения, и флокулы, образующиеся в процессе флокуляции, имеют сложную форму (отличную от шарообразной). Майкл и Болджер в 1962 г. высказали предположение о существовании прослойки жидкости вокруг каждого кластера в суспензии. Предсказать или вычислить толщину этой прослойки достаточно трудно. Количество жидкости зависит от степени концентрации кластеров, а также скорости их осаждения [59, 90].

На рисунке 3.13 представлены профили концентраций в цилиндроконическом сгустителе при различных значениях коэффициента сферичности флокулы [59].

Чем более сложной и отличной от шарообразной является форма агрегатного образования (форма кластера), тем большее количество жидкости находится в прослойке между соседними флокулами и, как следствие, тем выше высота постели в сгустителе. Зависимость высоты постели в сгустителе от коэффициента сферичности флокулы имеет вид полинома третьей степени [59];

5. рассчитывает профиль концентрации в сгустителе – осветлителе с переменной площадью поперечного сечения, где учитывается цилиндрическая и цилиндроконическая части аппарата [59, 90].

Традиционные сгустители имеют две секции с разными областями, цилиндр сверху и конус на дне для облегчения сброса нижнего продукта и для дополнительного эффекта уплотнения. При моделировании реального сгустителя часто игнорируются эти факты и предполагается постоянное поперечное сечение. С практической точки зрения подобные модели не подходят для моделирования высокоскоростных сгустителей и осветлителей, питаемых на уровне ниже уровня осадка (взвешенный осадок), т.к. модель не допускает подъема суспензии над уровнем подачи. Описание модели сгустителя подробно описано в трудах 1995-2003 г.г. Диеля, Бюргера и соавторов [59].

Профиль концентрации, полученный при одинаковых начальных исходных данных, для цилиндрического и цилиндрикоконического сгустителя представлен на рисунке 3.14 [59].

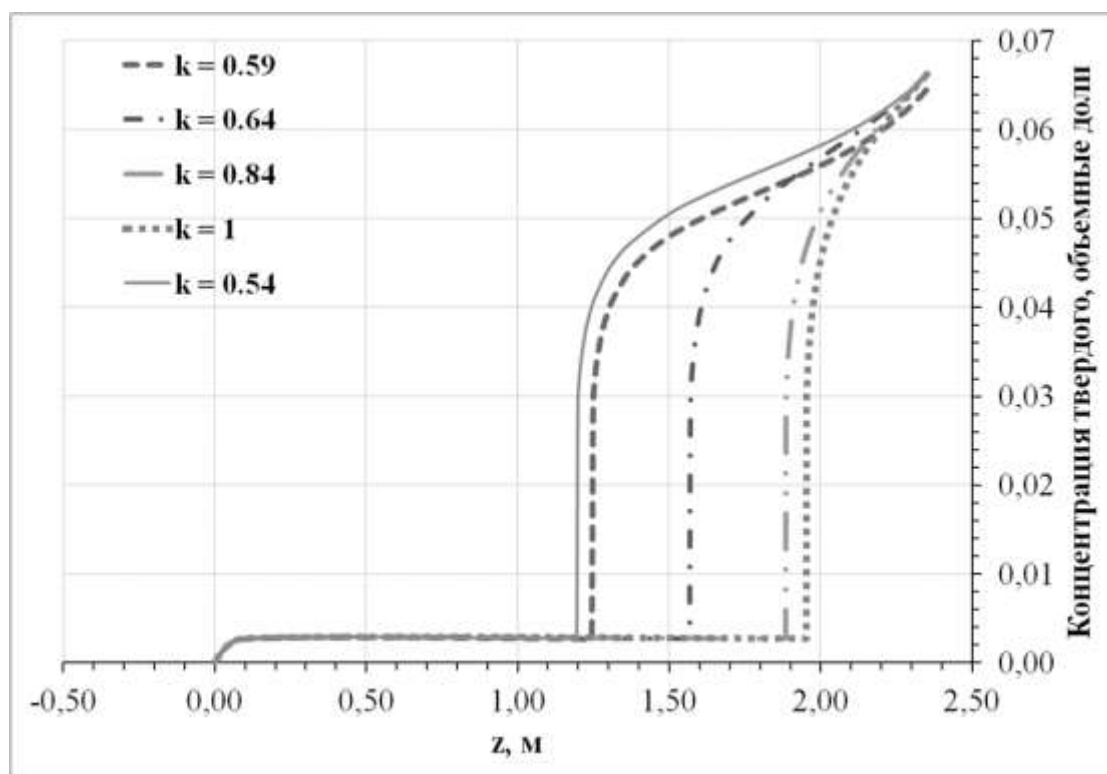


Рисунок 3.13 – Профиль концентрации в сгустителе

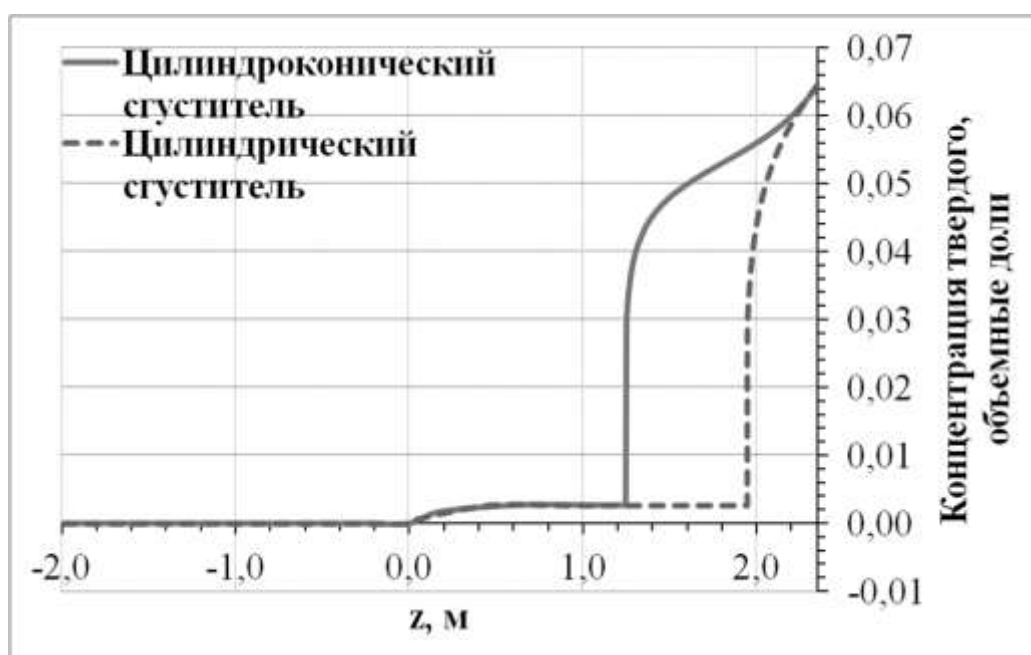


Рисунок 3.14 – Профиль концентрации в сгустителе

Учет при моделировании процесса сгущения конической части сгустителя для исследуемого ОУ позволяет на 30 % уменьшить погрешность при расчете высоты постели.

Кривая, описывающая профиль концентрации для цилиндроконического сгустителя, характеризуется вогнутым участком, что свидетельствует о дополнительной консолидации осадка за счет конической части агрегата. Коническая часть сгустителя выступает в роли осадкоуплотнителя [59].

3.6 Модель зоны осветления

Для того чтобы твердая фаза, поступившая в сгуститель с питающей пульпой, большей частью осаждалась на дно, необходимо чтобы скорость осаждения была больше, чем объемная скорость потока суспензии в зоне осветления, Q_0 .

Пусть φ_0 – концентрация твердого в осветленном сливе сгустителя, тогда для малых значений φ_0 функция плотности потока Кинча $f_{bk}(\varphi_0)$ может быть линейно аппроксимирована произведением концентрации на скорость Стокса. Концентрация твердого в верхнем сливе сгустителя может быть выражена как [24]:

$$C_{OF} \approx K \cdot K' \frac{Q_F \varphi_F}{s \left(\frac{Q_D}{S} + U_{S\infty} \right)} \quad (3.57)$$

где K – коэффициент, отражающий пропорциональную зависимость выхода твердой фракции в осветленный слив от концентрации твердой фракции в точке питания z_F для образцового сгустителя, K' – поправочный коэффициент, позволяющий учитывать зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации.

3.6.1 Расчет коэффициента K

Коэффициент K зависит от исследуемого технологического процесса и может быть определен при сравнении расчетных и архивных данных.

Образцовый сгуститель должен характеризоваться стабильным содержанием твердой фракции в верхнем сливе в диапазоне технологической уставки,

плотностью сгущенного продукта в заданном диапазоне и максимально возможной производительностью для данного сгустителя.

В качестве образцового сгустителя выступил сгуститель № 2. Сгуститель № 2 характеризуется содержанием твердой фракции в верхнем сливе сгустителя на протяжении всего периода измерений в диапазоне 70 - 200 мг/л, при этом объемный расход питания в сгуститель около 350 – 550 м³/ч, объемный расход сгущенного продукта в диапазоне 80 – 110 м³/ч, объемный расход осветленного раствора – 240 – 440 м³/ч. Сгуститель характеризуется полной производительностью. Высота постели варьируется в диапазоне от 0.4 – 0.7 м, ток, потребляемый двигателем при вращении граблин, варьируется в диапазоне 2-2.3 А, граблины максимально опущены на глубину сгущенного слоя.

Коэффициент К получен как отношение архивных значений мутности в верхнем сливе сгустителя к мутности, рассчитанной по модели, включающей подмодели зон флокуляции, стесненного осаждения и уплотнения осадка, и равен 0.14. Результат представлен на рисунке 3.15.

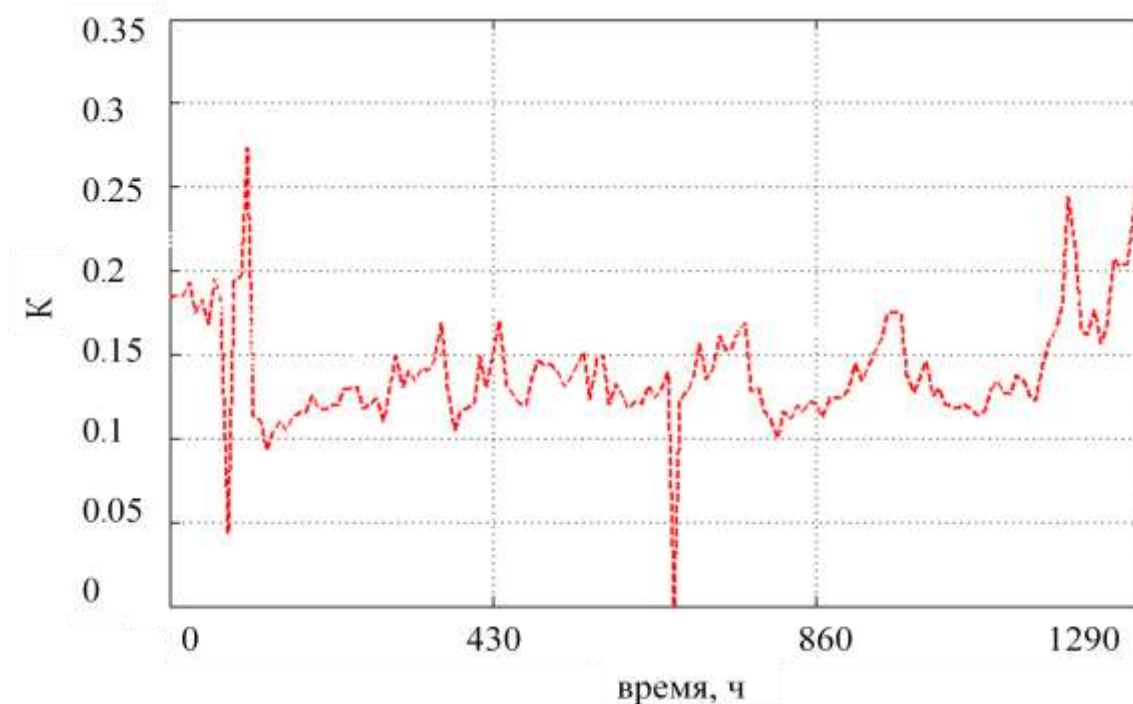


Рисунок 3.15 – Коэффициент К, рассчитанный для образцового сгустителя

3.6.2 Расчет коэффициента K'

Как показал анализ архивных производственных данных мутность слива сильно коррелирует с параметрами «высота граблин» и «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин».

Известные модели управления сгустителями не отражают зарастание аппарата в процессе его эксплуатации, это приводит к тому, что управление по рассчитанным моделям с увеличением зарастания сгустителя не справляется с поддержанием целевой функции на заданном значении.

Днище и граблины сгустителя во время работы обрастают шламом, в результате:

- резко ухудшаются условия работы привода. По статистике для предотвращения 20 аварий сгустители вынуждены останавливаться для профилактической чистки граблин и днищ примерно 1-2 раза в год;

- уменьшается полезный объем сгустителя. Уменьшение объема повышает скорость восходящего потока суспензии, что снижает плотность нижнего продукта и повышает вынос твердой фракции с осветленным сливом;

- накапливающийся на граблинах КШ, периодически обрушивается в виде крупной плотной массы, которая не успевает разбавиться суспензией и, как следствие:

- ✓ может закупориться патрубок отвода сгущенной суспензии;
- ✓ нарушится процесс консолидации осадка, т.к. уплотнение КШ происходит под действием сил давления от вышележащих слоев и при формировании каналов «выталкивания» жидкости для дополнительной консолидации флоккул, то при больших плотных наростах на граблинах данный процесс будет нарушен.

Коэффициент K' является поправочным коэффициентом, позволяющим учитывать зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации (уравнение 3.58).

$$K' = f(I, H_{rake}) \quad (3.58)$$

Коэффициент K' получен как отношение архивных значений мутности в верхнем сливе к мутности, рассчитанной по модели, включающей подмодели зон флокуляции и стесненного осаждения и уплотнения осадка и коэффициент K , отражающий пропорциональную зависимость выхода твердой фракции в осветленный слив от концентрации твердой фракции в точке питания z_F для образцового сгустителя № 2. Значение коэффициента K получено в разделе 3.6.1 и равно 0.14.

Полученный массив данных по параметру K' имеет тесную корреляционную зависимость от параметров «высота граблин» и «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин» (таблица 3.6).

Таблица 3.6 – Результаты корреляционного анализа исследуемых параметров

	K'	Высота граблин	Ток, потребляемый двигателем при вращении граблин
K'	100	- 44.35	73.16
Высота граблин	- 44.35	100	- 55.96
Ток, потребляемый двигателем при вращении граблин	73.16	- 55.96	100

Для выявления вида зависимости была изучена информация по нескольким способам построения модели: линейная регрессия, нелинейная регрессия, метод многомерной аппроксимации на основе случайных функций. Метод многомерной аппроксимации на основе случайных функций показал хорошие результаты при тестировании полученной функции на новом срезе данных, но данный метод, который относится к методам машинного обучения, сильно усложняет существующую модель ОУ при ее реализации в программной среде MatLab, т.к. представляет не аналитическое выражение, а числовое значение функции в любой точке.

В качестве инструмента для построения модели кривых и поверхности с использованием робастной регрессии по МНК с весовыми коэффициентами использовался Curve Fitting Toolbox от MatLab.

С помощью регрессионного анализа [93, 94, 95] была получена зависимость коэффициента K' от параметров, характеризующих зарастание сгустителя в процессе эксплуатации. Регрессионный анализ для всего объема архивных технологических данных показал следующую зависимость коэффициента K' от параметров, которая представлена в виде поверхности от двух параметров (рисунок 3.16).

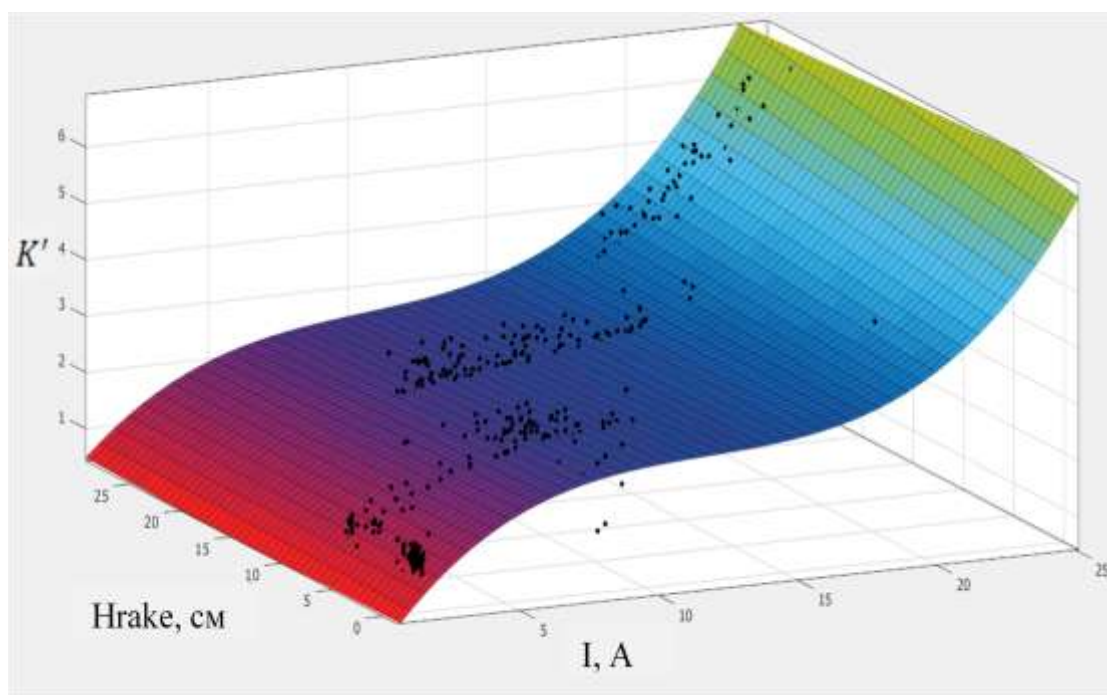


Рисунок 3.16 – Поверхность, отражающая зависимость между поправочным коэффициентом K' и показателями зарастания сгустителя в процессе его эксплуатации

На рисунке 3.17 отображены ошибки или остаточные разности, рассеянные случайным образом по поверхности и равномерно вокруг нулевого значения – аппроксимированной функции (поверхности). Отклонения остатков может быть в положительную и отрицательную сторону от аппроксимированной

функции. Отклонения в редких случаях превышают значение ± 0.5 . Преобладающая часть массива данных характеризуется остаточной разностью не более ± 0.3 .

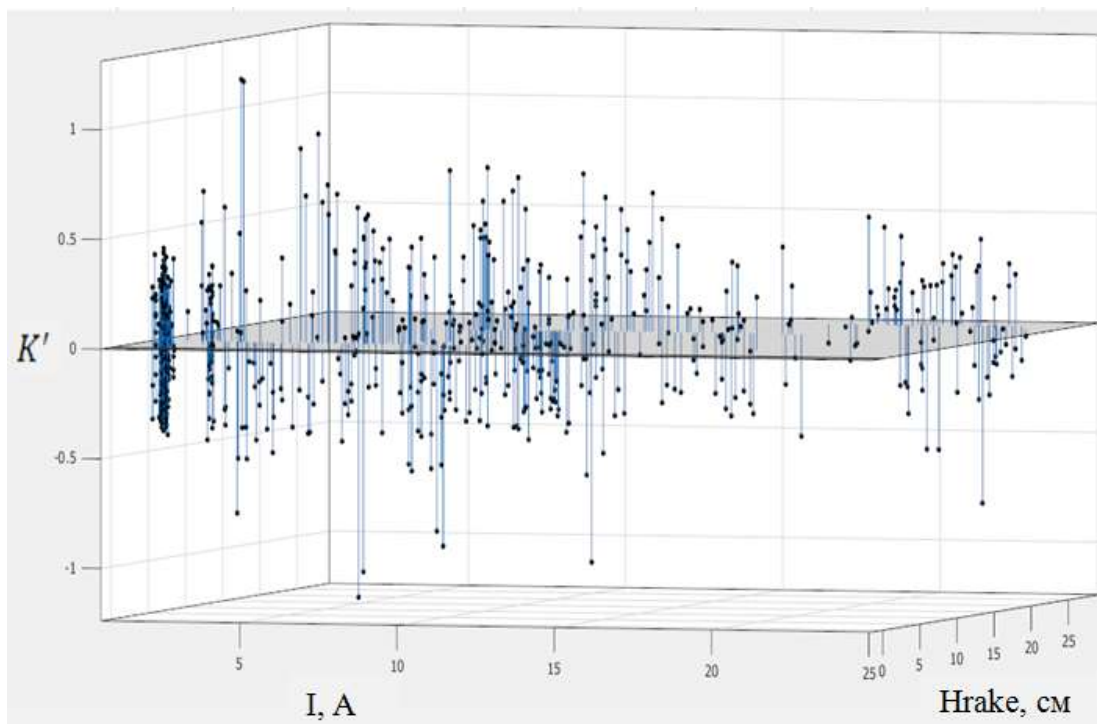


Рисунок 3.17 – Поверхность, отражающая остаточную разность (ошибки) между аппроксимированной функцией и архивными точками данных

3.6.3 Робастная регрессия

Метод робастной регрессии — локально взвешенное сглаживание. Это итерационный процесс, в котором объекты с большими отклонениями получили меньший вес, после чего регрессия строилась заново. Итерации повторялись до тех пор, пока веса не стабилизируются [93, 94].

Ещё один способ заключается в том, чтобы вместо квадратичной функции потерь ввести ограниченную сверху функцию, которая в окрестности нуля ведёт себя как квадратичная, а на бесконечности стремится к горизонтальной асимптоте [93, 94].

Одной из основных гипотез МНК является предположение о равенстве дисперсий отклонений e_i , т.е. их разброс вокруг среднего (нулевого) значения ряда должен быть величиной стабильной. Это свойство называется гомоскедастичностью. На практике дисперсии отклонений достаточно часто неодинаковы, то есть наблюдается гетероскедастичность. Это может быть следствием разных причин. Например, возможны ошибки в исходных данных. Случайные неточности в исходной информации, такие как ошибки в порядке чисел, могут оказать ощутимое влияние на результаты. Часто больший разброс отклонений e_i , наблюдается при больших значениях зависимой переменной (переменных). Если в данных содержится значительная ошибка, то, естественно, большим будет и отклонение модельного значения, рассчитанного по ошибочным данным.

Методы, нечувствительные к искажениям предполагаемого распределения, называются робастными. Простой эвристический способ построения робастного МНК (взвешенного МНК) состоит в просеивании выборки. Задача решается несколько раз. После каждого раза из обучающей выборки исключается некоторая доля объектов, имеющих слишком большие невязки $\varepsilon_i = f(x_i, \alpha) - y_i$. Итерации продолжаются до тех пор, пока удаётся выделять объекты с большими невязками. На практике двух итераций бывает достаточно. Максимальная доля отсеиваемых объектов задаётся исходя из содержания задачи. Например, если выбросы действительно обусловлены грубыми ошибками измерений, то на гистограмме распределения невязок соответствующие точки легко отделяются с помощью статистических или эвристических критериев. Эта идея легко обобщается на тот случай, когда нет чёткого критерия для выделения выбросов.

Пусть на первом этапе оценена линейная регрессионная модель с помощью стандартного МНК. Предположим, что остатки e_i независимы между собой, но имеют разные дисперсии (поскольку теоретические отклонения e_i нельзя рассчитать, их обычно заменяют на фактические отклонения зависимой переменной от линии регрессии, для которых формулируются те же исходные

требования, что и для e_i). В этом случае квадратную матрицу ковариаций $\text{cov}(e_i, e_j)$ можно представить в виде (3.59) [95]:

$$V = \begin{pmatrix} s_1^2 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & s_3^2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & s_n^2 \end{pmatrix} \quad (3.59)$$

где $\text{cov}(e_i, e_j) = 0$ при $i \neq j$, $\text{cov}(e_i, e_i) = s_i^2$, n - длина рассматриваемого временного ряда. Если величины s_i^2 известны, то далее можно применить взвешенный МНК, используя в качестве весов величины $\frac{1}{s_i^2}$ и минимизируя сумму (3.60) [95]:

$$Q_i = \sum_i \left\{ \frac{1}{s_i^2} \cdot (y_i - a - bx_i)^2 \right\} \quad (3.60)$$

Формула (3.60) записана для парной регрессии. Аналогичный вид она имеет и для множественной линейной регрессии. Оценки параметров не только получаются несмещенными (они будут таковыми и для обычного МНК), но и более точными (имеют меньшую дисперсию), чем не взвешенные оценки [95].

3.6.4 Результат обучения

В результате получена аппроксимированная функция, которая проходит через экспериментальные точки с большой точностью. Зависимость представлена в виде:

$$K' = 2.503 + 0.5741 \cdot I - 0.06849 \cdot H_{rake} - 0.5677 \cdot I_2 - \\ - 0.02072 \cdot I \cdot H_{rake} + 0.3227 \cdot I_3 + 0.05573 \cdot I_2 \cdot H_{rake} \quad (3.61)$$

Изменение тока, потребляемого двигателем из сети (ток растет пропорционально моменту нагрузки на двигатель при вращении граблин) производилось в диапазоне $I = 0 \div 25$ [А], изменение высоты граблин - $H_{rake} = 0 \div 30$ [см].

3.6.5 Тестирование обученной функции

Полученная функция была протестирована на срезах данных для пяти параллельно работающих сгустителей, которые характеризуются различной степенью производительности в зависимости от объема поступающей питающей пульпы, различной степенью зашламовывания и зарастания аппарата вследствие чистки аппаратов в разные периоды времени. Результаты значений поправочного коэффициента K' , рассчитанных по полученной функции, и значения коэффициента K' , рассчитанные по архивным данным, представлены на рисунках 3.19 – 3.23.

Сгуститель № 1 (рисунок 3.18) характеризуется содержанием твердой фракции в верхнем сливе сгустителя в диапазоне 80-400 мг/л, при этом объемный расход питания в сгуститель около 300-470 м³/ч, объемный расход откачки сгущенного продукта в диапазоне 90-120 м³/ч, объемный расход осветленного раствора – 180-380 м³/ч, что говорит о низкой производительности сгустителя. Производительность сгустителей характеризуется объемом осветленного раствора получаемого с 1 м² площади осаждения.

Сгуститель № 1 был подвержен плановой чистке более 1 месяца назад на момент снятия измерений. Начиная с 1600 ч наблюдается рост высоты постели, при этом постоянно меняется нагрузка на двигатель, вращающий граблины, что негативно сказывается как на самом двигателе, так и на ведении процесса в целом. Данные скачки по высоте постели, а, следовательно, по мутности верхнего слива, плотности сгущенного продукта, нагрузке на двигатель связаны, скорее всего, не только с нарастающим зашламовыванием сгустителя, но и с периодическим налипанием плотной массы шлама на граблины, которая периодически может обрушиваться и нарушать процесс уплотнения в нижних слоях сгустителя, уменьшает диаметр патрубка, через который откачивается сгущенный продукт. И как следствие существующая СУ постоянно меняет управляющие воздействия в попытках стабилизировать плотности.

Также необходимо отметить, что данный сгуститель на ветке сгущения на момент измерения данных (до модернизации процесса сгущения на исследуемом переезде) характеризовался отличной от других сгустителей формой питающего стакана (стакан открытого типа). Как показывают исследования, проводимые компанией CSIRO (Австралия), экспериментальное исследование, проводимое в данной работе, открытый тип колодца в сгустителях/осветлителях больших размеров приводит к тому, что не весь объем аппарата загружен твердой фракцией равномерно, образуются острова, в которых вязнут граблины, высота постели как следствие также неравномерна по объему аппарата, нарушается процесс консолидации.

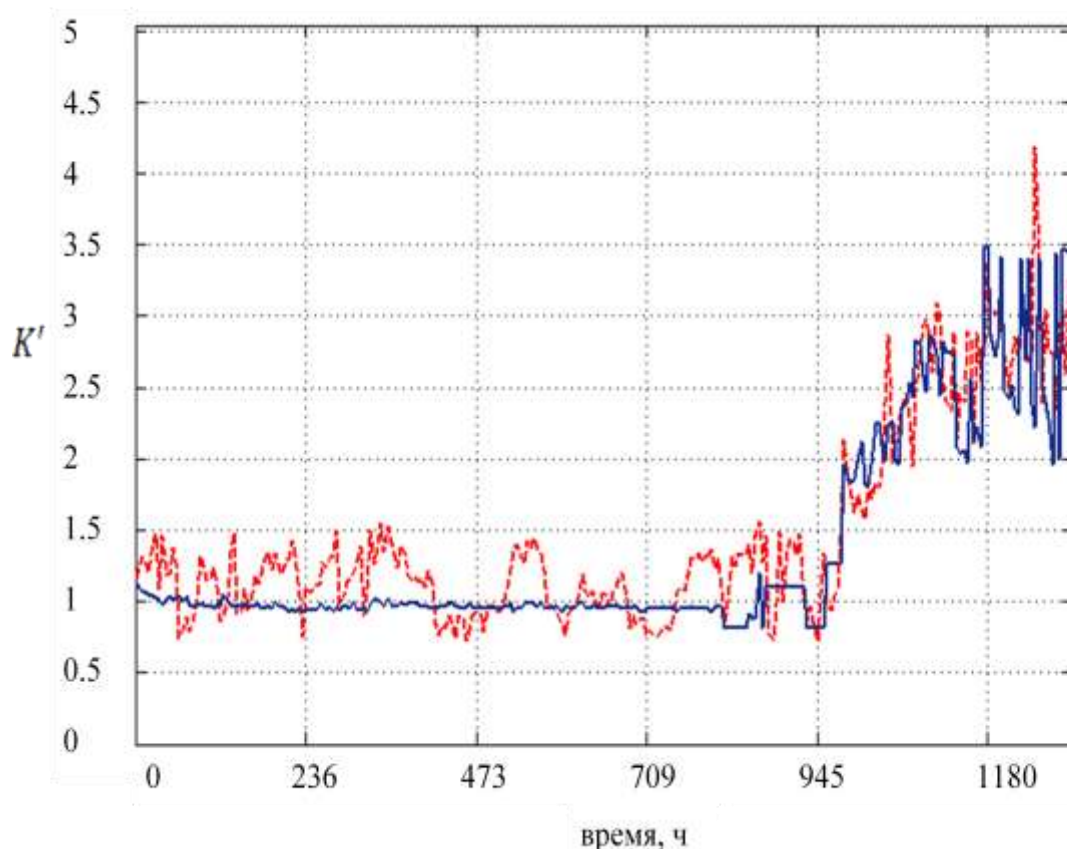


Рисунок 3.18 – Сопоставление результатов значений поправочного коэффициента K' , рассчитанных по аппроксимированной функции (синий тренд) и по архивным данным (красный тренд)

На рисунке 3.18 сопоставлены результаты значений поправочного коэффициента, рассчитанных по модели и значений коэффициента K' , рассчитанных по архивным данным сгустителя № 1.

Наибольшие отклонения расчетного значения наблюдаются на участке 0-1600 ч, СКО расчетного значения составляет 0.4117, что соответствует 30-55 мг/л в перерасчете на содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

Сгуститель № 2 (рисунок 3.19) использовался в качестве образцового сгустителя. На рисунке 3.20 сопоставлены результаты значений поправочного коэффициента, рассчитанных по модели и значений коэффициента K' , рассчитанных по архивным данным.

СКО расчетного значения составляет 0.3427, что соответствует 25 – 70 мг/л в перерасчете на содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

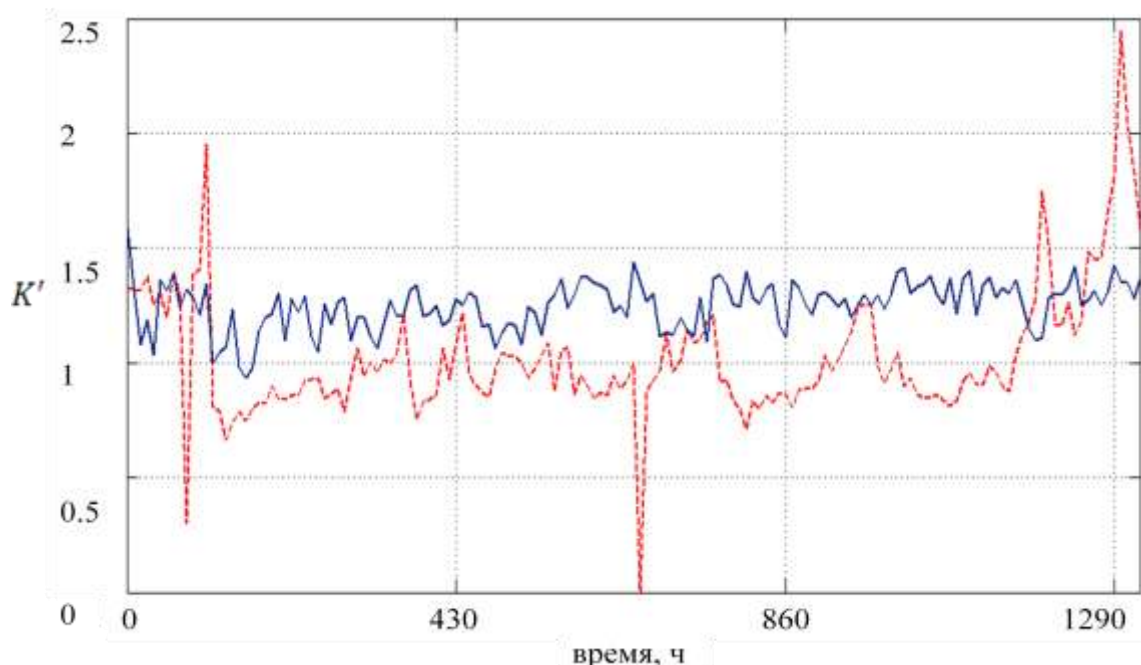


Рисунок 3.19 – Сопоставление результатов значений поправочного коэффициента K' , рассчитанных по аппроксимированной функции (синий тренд) и по архивным данным (красный тренд)

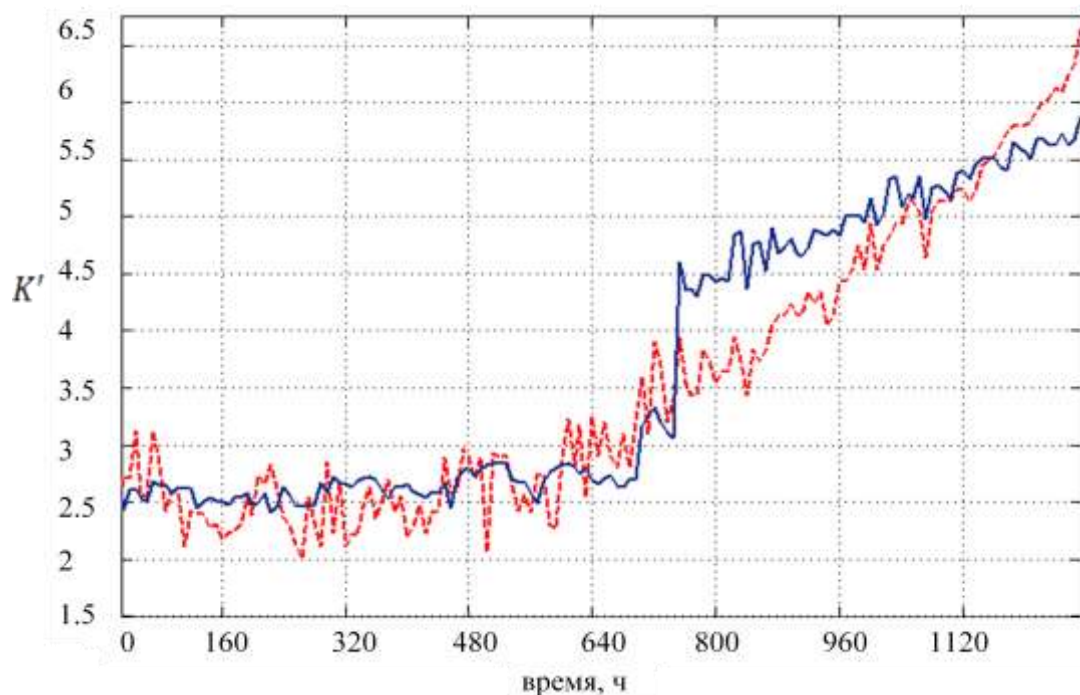


Рисунок 3.20 – Сопоставление результатов значений поправочного коэффициента K' , рассчитанных по аппроксимированной функции (синий тренд) и по архивным данным (красный тренд)

Сгуститель № 3 (рисунок 3.20) характеризуется на всем промежутке измерений высоким содержанием твердого в верхнем сливе в диапазоне 450 – 1000 мг/л. Сгуститель был подвержен плановой чистке более 5 месяцев назад на момент снятия измерений. При поддержании объемного расхода питания в сгуститель № 3 в диапазоне 400 - 480 м³/ч, объемного расхода сгущенного продукта – 80 - 120 м³/ч параметр объемный расход слива находится в диапазоне 320 – 360 м³/ч, что говорит о низкой производительности данного сгустителя. При этом наблюдается высокий уровень постели в диапазоне 0.9 – 2.1 м, нагрузка на двигатель, вращающий граблины, в диапазоне 18 – 25 А, высота граблин – 28 см (при максимальном значении 28 см). Архивные производственные данные указывают на то, что сгуститель №3 на момент измерений имеет меньший полезный объем сгущения/осветления в следствие зашламовывания и застарания аппарата.

На рисунке 3.20 сопоставлены результаты значений поправочного коэффициента, рассчитанных по модели и значений коэффициента K' , рассчитанных по архивным данным сгустителя № 3.

СКО расчетного значения составляет 0.4597, что соответствует 100-115 мг/л в перерасчете на содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

Сгуститель № 4 (рисунок 3.21) характеризуется на всем промежутке измерений содержанием твердого в верхнем сливе в диапазоне 200 – 500 мг/л. Сгуститель был подвержен плановой чистке более 3,5 месяцев назад на момент снятия измерений. При поддержании объемного расхода питания в сгуститель № 4 в диапазоне 300 – 420 м³/ч, объемного расхода сгущенного продукта – 85 – 100 м³/ч параметр объемный расход слива находится в диапазоне – 215 – 320 м³/ч. При этом уровень постели находится в диапазоне 0.8 – 1.5 м, нагрузка на двигатель, вращающий граблины, в диапазоне 10 – 14 А, высота граблей – 15-17 см. Архивные производственные данные указывают на то, что сгуститель № 4 на момент измерений имеет полезный объем сгущения/осветления меньше, чем на момент сразу после чистки аппарата в следствие зашламовывания и зарастания аппарата и граблей.

Также необходимо отметить, что для процесса флокуляции в питающем стакане исследуемого ОУ объемный расход подачи питания должен быть больше, чем поддерживаемый диапазон на сгустителе № 4.

На рисунке 3.21 сопоставлены результаты значений поправочного коэффициента, рассчитанных по модели и значений коэффициента K' , рассчитанных по архивным данным сгустителя № 4.

СКО расчетного значения составляет 0.3682, что соответствует 35-75 мг/л в перерасчете на содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

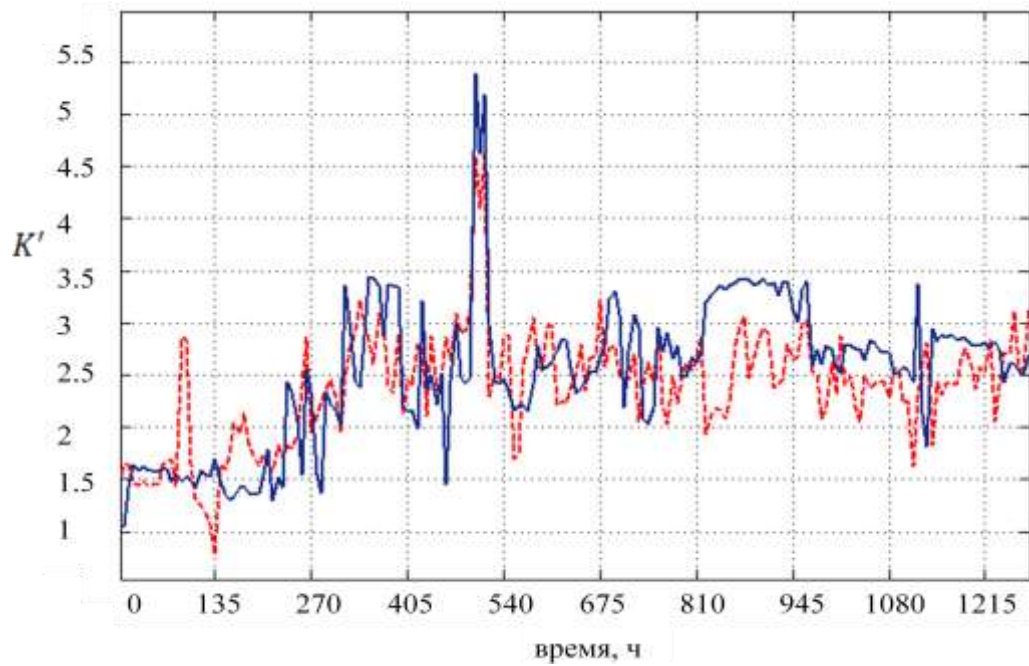


Рисунок 3.21 – Сопоставление результатов значений поправочного коэффициента K' , рассчитанных по аппроксимированной функции (синий тренд) и по архивным данным (красный тренд)

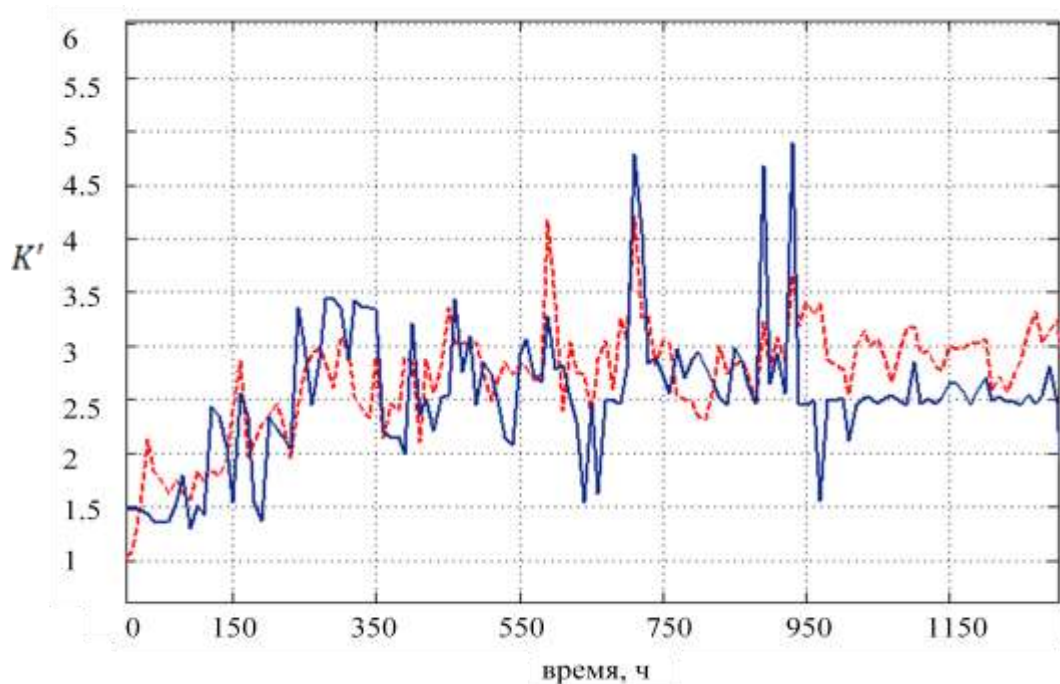


Рисунок 3.22 – Сопоставление результатов значений поправочного коэффициента K' , рассчитанных по аппроксимированной функции (синий тренд) и по архивным данным (красный тренд)

Сгуститель № 5 (рисунок 3.22) характеризуется на всем промежутке измерений содержанием твердого в верхнем сливе в диапазоне 200 – 450 мг/л. Сгуститель был подвержен плановой чистке более 3,5 месяцев назад на момент снятия измерений также как и сгуститель № 5. Поддерживаемый объемный расход питания в сгуститель № 5 находится в диапазоне 340 – 450 м³/ч, объемный расход откачиваемого сгущенного продукта – 90 – 120 м³/ч, параметр объемный расход слива находится в диапазоне 250 – 330 м³/ч, что говорит о низкой производительности данного сгустителя. Уровень постели в диапазоне 0.4 – 1.6 м, нагрузка на двигатель, вращающий граблины, в диапазоне 7 – 14 А, высота граблин – 15-17 см.

Также необходимо отметить, что для сгустителя № 5 аналогично сгустителю № 4, для процесса флокуляции в питающем стакане объемный расход подачи питания должен быть больше, чем поддерживаемый диапазон на сгустителе № 5.

На рисунке 3.22 сопоставлены результаты значений поправочного коэффициента, рассчитанных по модели и значений коэффициента K' , рассчитанных по архивным данным сгустителя № 5.

СКО расчетного значения составляет 0.5094, что соответствует 50-75 мг/л в перерасчете на содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

Качество работы обученной функции на срезах данных зависит от наличия шумов измерения параметров на этапе считывания и архивирования данных на переделе сгущения, а также от наличия случайной компоненты, которые не несут никакой информации о получаемой зависимости. На этапе формирования данных полезность считываемых параметров, а точнее полезность считываемых значений каждого параметра, ещё не очевидна, поэтому измеряются все доступные характеристики ОУ. На практике, если зависимость функции от параметров имеет случайную компоненту: при измерениях, полученных в разные моменты времени, значение функции не одинаково для одинакового набора значений параметров, а, следовательно, присутствует случайная компонента,

которая вносит зашумленность в данные, участвующие в обучении. Таким образом, включение шумового значения параметра в регрессионную модель ухудшает её качество, но добавление любого линейно независимого значения в выборку строго уменьшает остаточную сумму квадратов, что позволяет более надёжно отличать информативные значения исследуемых параметров от зашумленных значений.

В разработанной модели для зоны осветления в расчете участвует средний диаметр частицы/флокулы, однако диапазон распределения твердой фракции в питании сгустителя или диапазон флокул/кластеров, образующихся в процессе флокуляции в питающем стакане, оказывает сильное влияние на массовый расход твердой фракции с верхним сливом сгустителя.

С целью компенсировать ошибки моделирования при расчете концентрации твердой фазы в верхнем сливе сгустителя введен поправочный коэффициент b_{PSD} в формулу (3.57). Коэффициент b_{PSD} для исследуемого ОУ рассчитывался с помощью программного комплекса ANSYS Fluent, ход работы и результаты описаны в разделе 3.7.

Концентрация твердого в верхнем сливе сгустителя может быть выражена как (3.62):

$$C_{OF} \approx K \cdot K' \cdot b_{PSD} \cdot \frac{Q_F \varphi_F}{S \left(\frac{Q_D}{S} + U_{S\infty} \right)} \quad (3.62)$$

3.7 CFD моделирование сгустителя

CFD моделирование процессов осаждения служит основой для понимания динамических процессов многофазного потока в сгустителе – осветлителе и предсказывает распределение твердой фракции по объему сгустителя при исследуемых режимах работы.

Трехмерная модель была разработана в программном пакете ANSYS Fluent и учитывает работу гребных лопастей в сгустителе, полидисперсность питающего потока, стесненное осаждение, эффективное сжатие твердого веще-

ства при помощи встроенных и добавленных пользователем моделей через UDF.

Непрерывная жидкая фаза описывалась в Эйлеровской постановке, а твердая фаза в Лагранжевой – основные два подхода для расчета многофазных потоков: метод Эйлера-Лагранжа и метод Эйлера-Эйлера [96, 97, 98, 99].

3.7.1 Метод Эйлера-Эйлера

Многофазный подход Эйлера рассматривает каждую фазу как отдельную фазу континуума с сохранением массы и импульсных уравнений. Модель позволяет фазам перемещаться с разными скоростями. Уравнение неразрывности имеет вид [96, 97, 98]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \frac{\partial}{\partial x_t}(\rho_m U_m) = 0 \quad (3.63)$$

где U_m – усредненная по массе скорость, ρ_m – плотность смеси, α_q – объемная доля в диапазоне от 0 до 1 [96, 97, 98]:

$$U_m = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q U_q}{\rho_m} \quad (3.64)$$

$$\rho_m = \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \quad (3.65)$$

Уравнение импульса для смеси можно получить, суммируя отдельные уравнения движения для всех фаз, где n – число фаз [96, 97, 98]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m U_{mi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m U_{mi} U_{mj}) = & -\frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu_m \left(\frac{\partial U_{mi}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{mj}}{\partial x_i} \right) + \\ & + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q U_{dr, qi} U_{dr, qj} \right) \end{aligned} \quad (3.66)$$

$U_{dr, q}$ – скорость диспергированной фазы относительно скорости объемного центра смеси, при условии $U_{dr, q} = U_q - U_m$ [96, 97, 98].

3.7.2 Модель турбулентности

Вязкость смеси в турбулентном потоке определяется моделью $k - \epsilon$ типа, стандартная модель вихревой вязкости, позволяет учитывать искривленность и

вращение систем (опция - производство турбулентной энергии), равна [96, 97, 98]:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.67)$$

где k и ε определяются при решении следующих уравнений [96, 97, 98]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m U_m k) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m U_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) \quad (3.69)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla U_m + (U_m)^T) : \nabla U_m \quad (3.70)$$

где $G_{k,m}$ – кинетическая энергия турбулентности, $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k$ и σ_ε – константы аналогичны константам для однофазных моделей [96, 97, 98].

3.7.3 Метод Эйлера-Лагранжа

Модель DPM (модель дискретной фазы) по методу Эйлера-Лагранжа строится путем решения усредненных по времени уравнений Навье-Стокса для жидкой фазы, которую рассматривают, как континуум, в то время как дисперсная фаза описывается путем отслеживания траектории большого числа частиц через расчетные поля течения. Дисперсная фаза может обмениваться с жидкой фазой импульсами, массой и энергией [96, 97, 98, 99].

Для модели DPM существует ограничение по содержанию твердой фракции в пульпе, дисперсная фаза должна иметь малую объемную долю (менее 10 – 12 %) несмотря на приемлемую большую массу частиц (m частицы $\geq m$ жидкость) [96, 97, 98, 99].

Использовалась модель DDPM (уплотненной дискретной фазы) преодолевает ограничение на приемлемую объемную долю твердых частиц, расширяя уравнения сохранения Лагранжа (непрерывность и импульс) [96, 97, 98], при этом частицы могут достигать плотной упаковки.

Баланс сил, действующих на частицу, прогнозирует траекторию частиц дискретной фазы путем интегрирования баланса сил на частицу, который записывается в лагранжевой системе отсчета. Этот баланс силы уравнивает инер-

цию с силами, действующими на частицу, и может быть записан (для направления в декартовой системе координат) как [96, 97, 98, 99]:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{-1}{\rho_p} \nabla \rho + F_D(U - U_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3.71)$$

где $F_D(U - U_p)$ – это сила сопротивления на единицу массы частицы [96, 97, 98, 99].

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3.72)$$

Где U – скорость жидкой фазы, U_p – скорость частицы, μ – вязкость жидкости, ρ – плотность жидкости, ρ_p – плотность частицы, d_p – диаметр частицы, Re – число Рейнольдса, которое определяется как [96, 97, 98, 99]:

$$Re = \frac{\rho d_p |U_p - U|}{\mu} \quad (3.73)$$

Коэффициент сопротивления, C_D , определяется как [96, 97, 98, 99]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (3.74)$$

где a_1 , a_2 , a_3 – константы, применяемые для гладких сферических частиц в рамках нескольких диапазонов Re [96, 97, 98, 99].

Также коэффициент сопротивления по Хайдеру и Левеншпилю можно выразить как [96, 97, 98, 99]:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + b_1 \cdot Re^{b_2}) + \frac{b_3 \cdot Re}{b_4 + Re} \quad (3.75)$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\alpha + 2.4486\alpha^2) \quad (3.76)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\alpha \quad (3.74)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\alpha + 18.4222\alpha^2 - 10.2599\alpha^3) \quad (3.77)$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.2584\alpha - 20.7322\alpha^2 + 15.8855\alpha^3) \quad (3.78)$$

$$\alpha = \frac{s}{S} \quad (3.79)$$

где α – коэффициент формы, s – это площадь поверхности сферы, имеющей такой же объем, как и частица, и является фактической площадью поверхности частицы [96, 97, 98, 99].

В качестве дополнительных сил, действующих на частицу, F_x , могут выступать силы, действующие на частицы, которые возникают из-за вращения системы отсчета. Эти силы возникают при моделировании потоков во вращающихся системах отсчета: градиент давления, термофоретическая, броуновское движение, сила Саффмана, например [99]. Также необходимо отметить, что в программном пакете при расчете по умолчанию отключена сила гравитации на частицу, в исследуемой работе силу гравитации необходимо учитывать.

3.7.4 Создание геометрической, сеточной и расчетной модели

Для построения геометрии использовался стандартный модуль Design modeler. Модель построена из двух основных частей – стационарный объем (корпус сгустителя) и динамический объем (призматический элемент – граблины) (рисунок 3.23) [99].

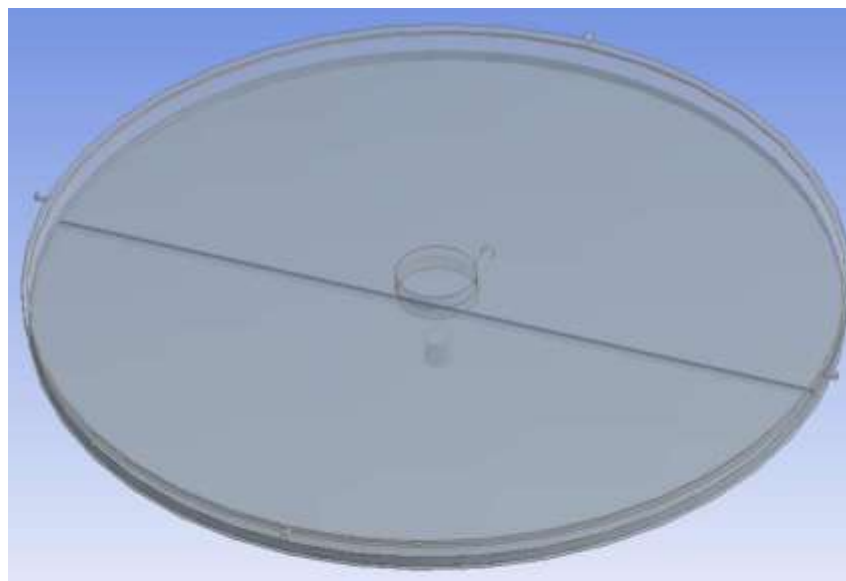


Рисунок 3.23 – Геометрия сгустителя

Гребные лопасти транспортируют осадок со дна резервуара к нижнему отверстию для сброса сгущенного слоя. Вторичный эффект гребных лопастей – это создание канала в осадке, через который вода может выходить в верхние слои, таким образом, увеличивая плотность пульпы нижнего продукта [99].

Для получения качественной расчетной сетки импортировалась 1/4 часть модели. Для построения использовался модуль Mesh (рисунок 3.24). Сетка изначально строилась как не структурированная тетраэдрическая, в последствие для ускорения расчета была переведена в полиэдрическую. Размерность сетки или решаемой задачи 2.6 млн ячеек. Области перехода плоскостей и пересечений выполнены с меньшим шагом сетки. На рисунке 3.25 указаны симметричные области, вход и выходы потока: где граничные условия для выхода нижнего продукта –mass flow outlet, для верхнего слива –pressure outlet. [99]. Для задания вращения одного из объемов (граблин) в процессе работы, была обозначена область контакта двух объемов [99].

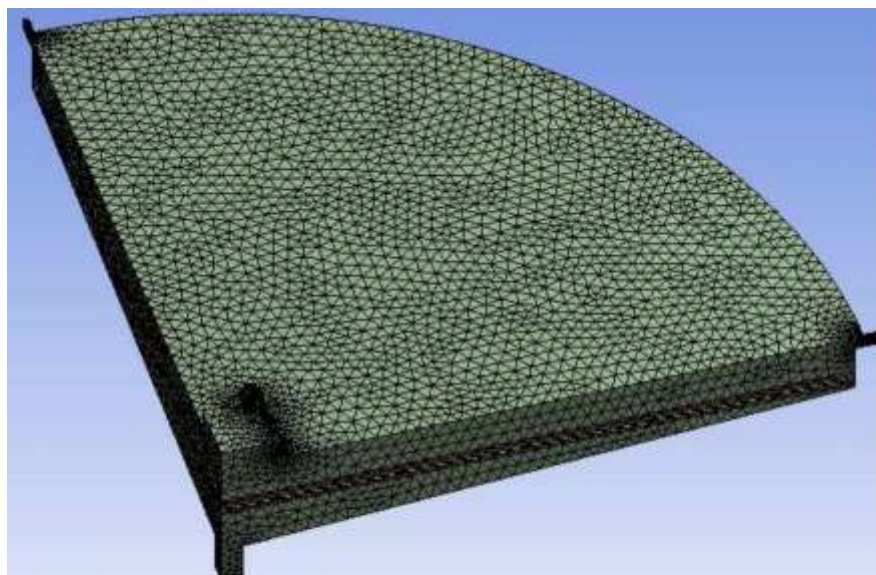


Рисунок 3.24 – Расчетная сетка объекта управления

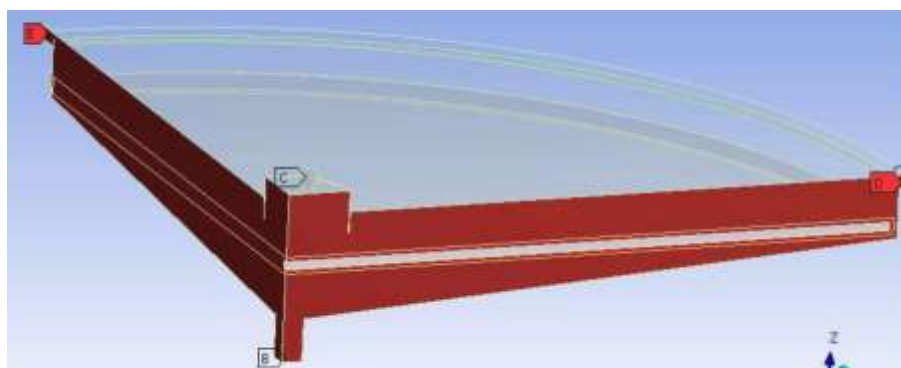


Рисунок 3.25 – Вход, выходы потока и симметричные области

Задача была реализована в стационарной постановке, количество фаз равно 5, диапазон распределения твердой фракции в пульпе после флокуляции определялся по результатам экспериментального исследования в программе «Excel Population Balance Model» [79].

Исходный гранулометрический состав твердой фракции в питающей пульпе определялся в ходе лабораторных исследований. Полученное распределение частиц по размерам использовалось как начальное распределение для расчета твердого в пульпе после процесса флокуляции в питающем стакане. В качестве входных параметров также использовались параметры, характеризующие состояние технологического процесса, представленные в таблице 2.1, и геометрические характеристики сгустителя, отображенные на рисунке 2.1.

В результате численных экспериментов получены следующие результаты (рисунки 3.26, 3.27): средневзвешенный диаметр флокулы равный 158 мкм, диапазон распределения флокул в питающем стакане после флокуляции для исследуемого процесса равный 10 – 600 мкм.

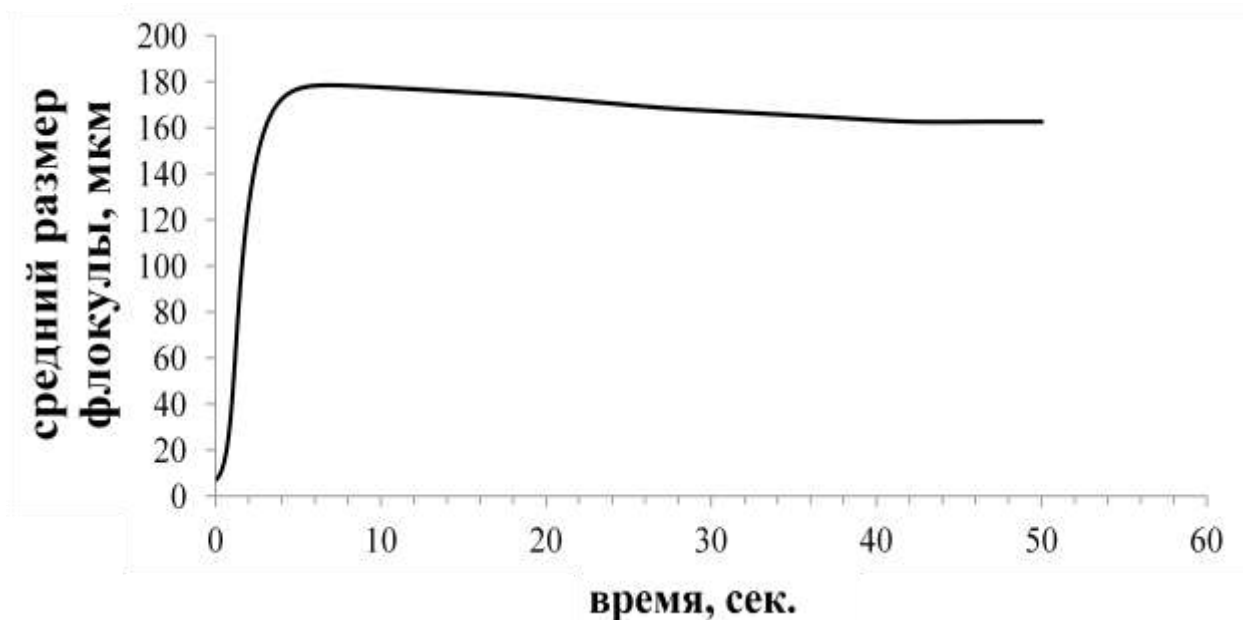


Рисунок 3.26 – Средний диаметр флокулы в питающем стакане после флокуляции для исследуемого процесса

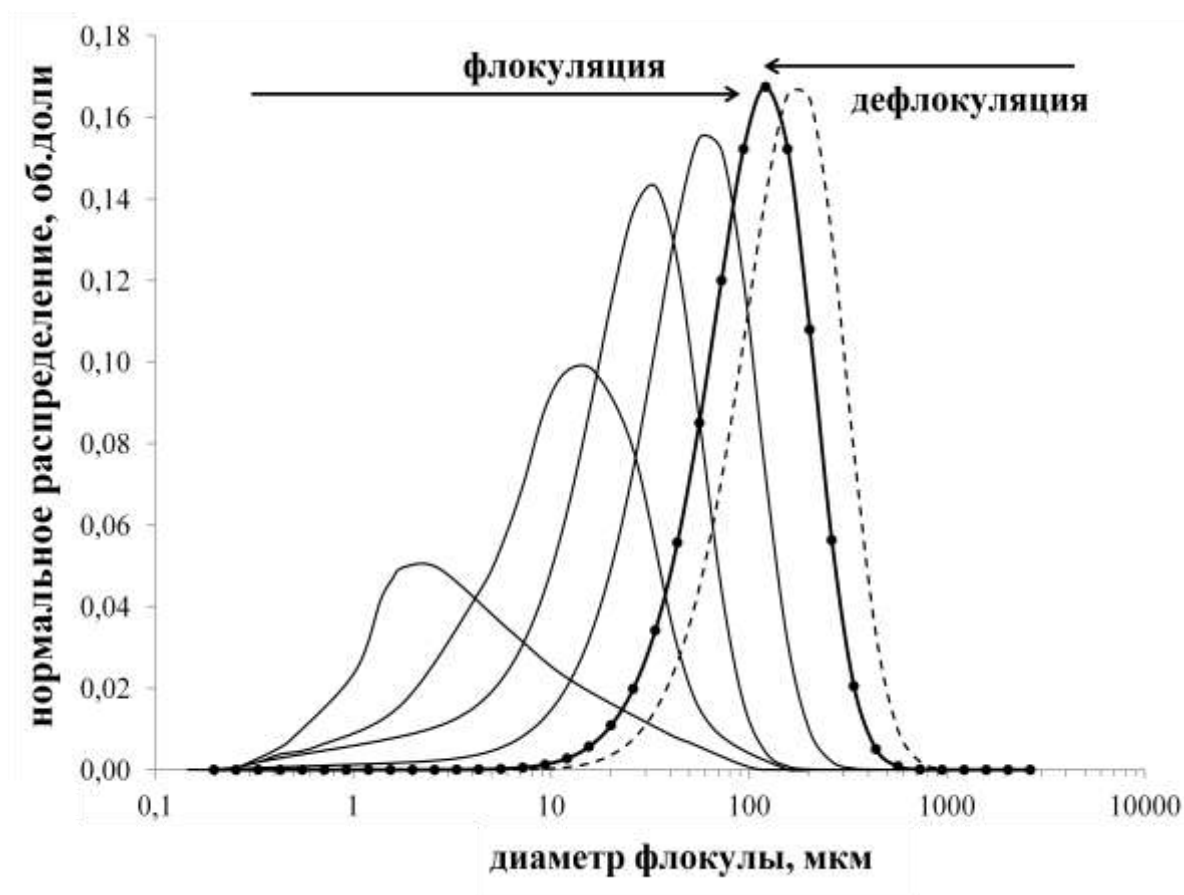


Рисунок 3.27 – Диапазон распределения флоккул в питающем стакане после флокуляции для исследуемого процесса

После достижения квазистационарного состояния выполнены экспериментальные исследования в трехмерной модели. При моделировании необходимо учитывать, что сгуститель – объект инерционный, запаздывание по некоторым каналам может быть порядка 8 ч.

3.7.5 Анализ расчетов CFD моделирования

Большинство моделей сгустителей не учитывают полидисперсность поступающей пульпы, а при расчете используют средний диаметр частицы или флоккулы.

На виртуальном лабораторном стенде проведено несколько вычислительных экспериментов с целью определения степени влияния на массовый вынос твердой фракции с осветленным слоем параметров «средний диаметр частицы/флокулы» и «диапазон частиц/флокул». В первом случае при моделирова-

нии задавался средневзвешенный диаметр флоккулы/частицы равный 158 мкм, во втором – распределение флокул/частиц в диапазоне 10 – 600 мкм. Такие параметры, как геометрические параметры ОУ, объемный расход пульпы питания, расход откачки сгущенного продукта, характеристики пульпы оставались неизменными для обоих экспериментов.

Как результат были получены значения массового расхода твердой фракции, $G_{i_ТВ_OF}$, покинувшей зону осветленного слоя для двух случаев, на данную итерацию, где одна итерация = шаг по времени/количество подшагов (таблица 3.7).

Массовый расход твердой фракции с верхним сливом сгустителя при задании в качестве начального параметра «диапазон распределения частиц/флокул в пульпе» выше, чем при использовании моночастицы при моделировании процесса.

Таблица 3.7 – Значения массового расхода твердой фракции, покинувшей зону осветленного слоя, для двух экспериментов

№ п/п	PSD, мкм	$G_{i_ТВ_OF}$, кг/ч
1	158	154.4
2	10-600	180.7

Для исследуемого ОУ $G2_{_ТВ_OF} = 1.17G1_{_ТВ_OF}$. Поправочный коэффициент b_{PSD} равен 1.17 .

Необходимо отметить, что при CFD моделировании в качестве геометрических размеров были приняты размеры исследуемого объекта управления. Питающий колодец в модели использовался открытого типа, что сказалось на неравномерном распределении питания в объеме сгустителя, что отчетливо видно по рисунку 3.28.

Неравномерное распределение питания в сгустителе приводит к беспорядочным отложениям твердого на дне чана сгустителя, с образованием так называемых «островов» на поверхности уплотненного слоя. Граблины механизма

сгустителя при движении вязнут в зоне «островов», что приводит к скачкообразным нагрузкам на привод сгустителя и, соответственно, скачкообразным изменениям крутящего момента. В прошлом неравномерность подачи пульпы и неравномерное распределение твердого по чану сгустителя нивелировались за счет увеличения расхода флокулянта и/или использования больших диаметров и объемов, что, в свою очередь, негативно сказывалось на операционных и/или капитальных затратах комплекса сгущения. В подавляющем большинстве случаев неудовлетворительная работа сгустителя была связана с ошибками, допущенными при проектировании питающего колодца.

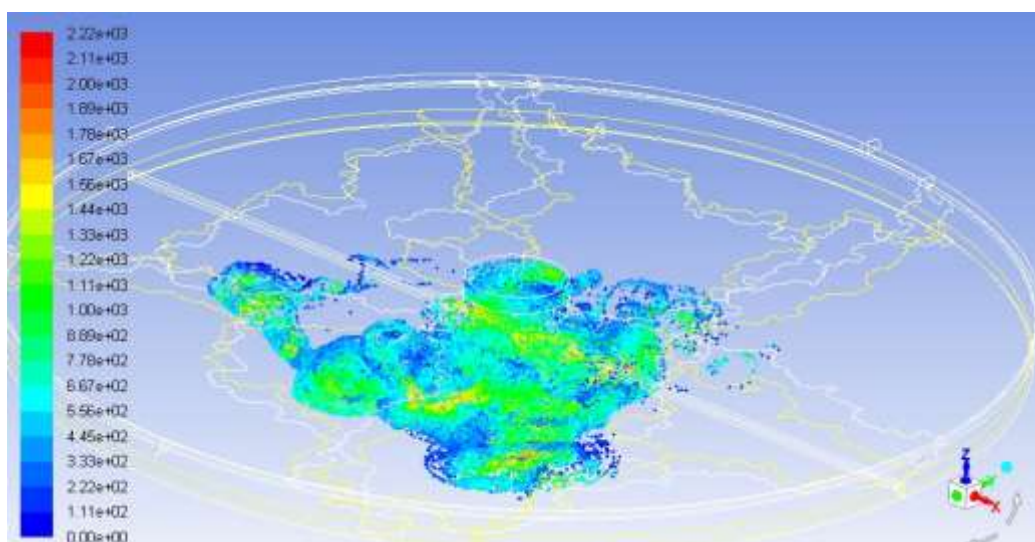


Рисунок 3.28 – Распределение твердой фракции в сгустителе

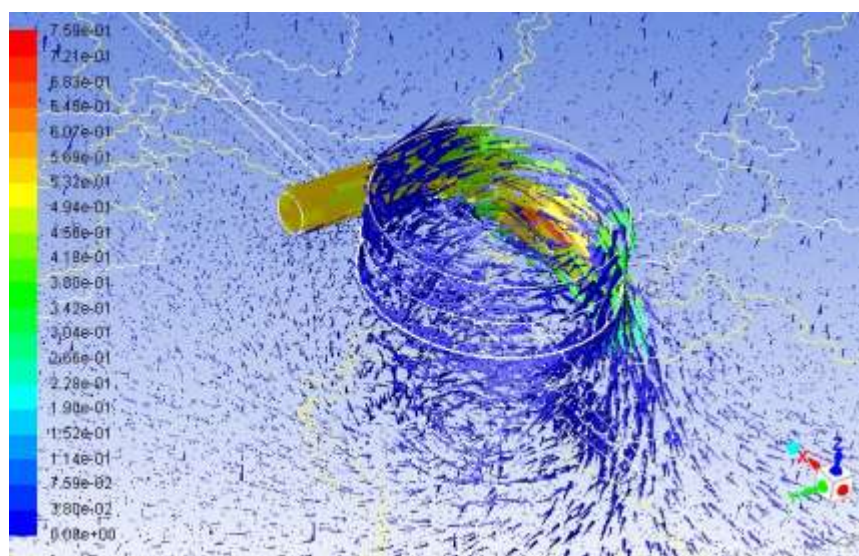


Рисунок 3.29 – Распределение твердой фракции в сгустителе

На рисунке 3.29 показан типичный пример неудовлетворительной работы питающего колодца. Поток, выходящий из питающего колодца с чрезмерной скоростью, буквально «выдувает» твердое из сектора чана сгустителя, расположенного напротив точки подачи питания в питающий колодец, заставляя частицы подниматься в светлый слой и уходить со сливом. При этом, как правило, более тяжелые частицы осаждаются в одном из секторов, т.е. неравномерное распределение твердого приводит к тому, что только часть сгустителя задействована для гравитационной фазы пульпы.

Также было замечено в ходе вычислительного эксперимента, что данная геометрия сгустителя с поддерживаемыми на производстве диапазонами технологических параметров, способствует образованию секторов турбулентности. Секторы турбулентности препятствуют осаждению частиц твердого, и способствуют переходу в осветленный слой и далее в слив сгустителя твердой фракции (рисунок 3.30).

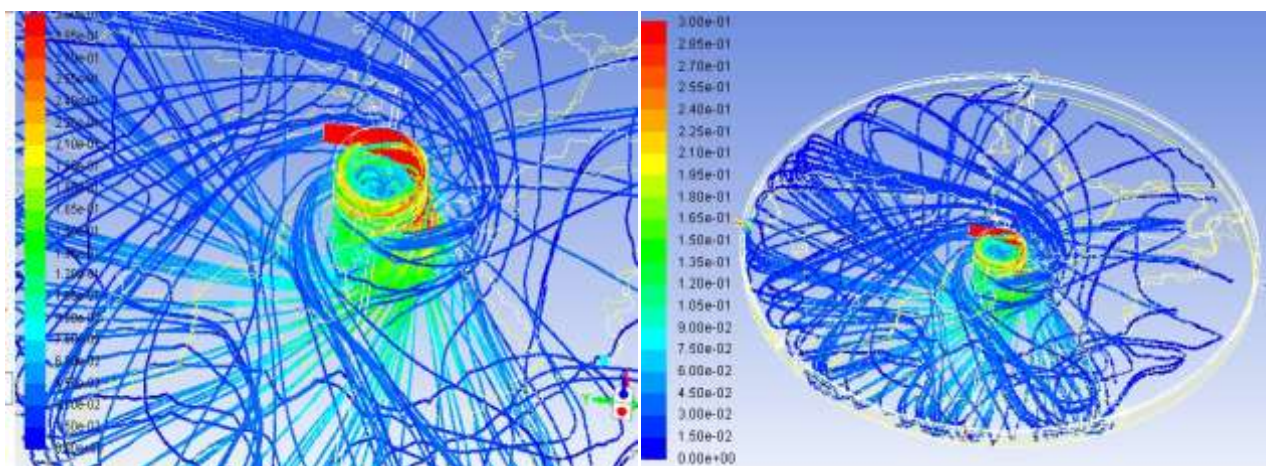


Рисунок 3.30 – Линии тока. Траектория частиц и интенсивность потока в питающем колодце и чане сгустителя

Для исследуемого ОУ целью является преобразование крутящего момента потока питания в радиальный поток, т.е. вращательный поток в верхней части питающего стакана должен переходить в радиальный поток на выходе из

внутренней камеры колодца, чтобы снизить завихрения потока в зонах стенок сгустителя и снизить тем самым вынос твердого в зону слива.

3.8 Обобщенная модель сгустителя

3.8.1 Обобщенная стационарная модель сгустителя

Обобщенная модель (рисунок 3.31) включает в себя модель процесса агрегации частиц, модель зоны осаждения и уплотнения осадка, модель зоны осветления, описанные в работе в предыдущих разделах.



Рисунок 3.31 – Схема обобщенной модели сгустителя

Модель зоны осветления позволяет рассчитывать концентрацию твердой фазы в верхнем сливе сгустителя. Для расчета коэффициента выноса твердой фракции с верхним сливом были проанализированы архивные данные технологического процесса и выведена зависимость коэффициента K от измеряемых параметров «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин» и «высота граблин».

Таким образом, разработанная и описанная в третьей главе обобщенная модель сгустителя учитывает зарастание днища и граблин шламом. В параллельно работающих сгустителях процесс зарастания происходит неодинаково во времени, но параметры «ток, потребляемый двигателем при вращении граблин», «высота граблин» помогают отслеживать зарастание и зашламовывание сгустителя.

3.8.2 Обобщенная динамическая модель сгустителя

Сгуститель – объект инерционный. Стационарная нелинейная модель решает задачу одномерного моделирования процесса осаждения твердой фракции/ флокулированной суспензии в сгустителе, описывается строго вырожденным диффузионным уравнением с разрывами потока.

Для последующего синтеза СУ на базе регулятора с прогнозирующей моделью необходимо использовать динамическую модель, т.к. главный принцип работы предиктивного регулятора – прогноз на несколько шагов вперед.

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 (рисунок 3.32). ДЛЭ модели воспроизводит динамические свойства исследуемого ОУ, СНЭ имитирует нелинейные свойства исследуемого ОУ.

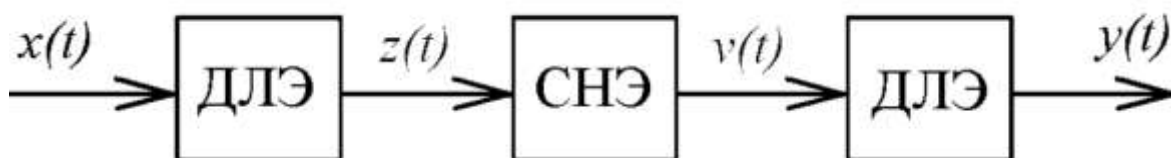


Рисунок 3.32 – Структурная схема каскадной модели Винера-Гаммерштейна

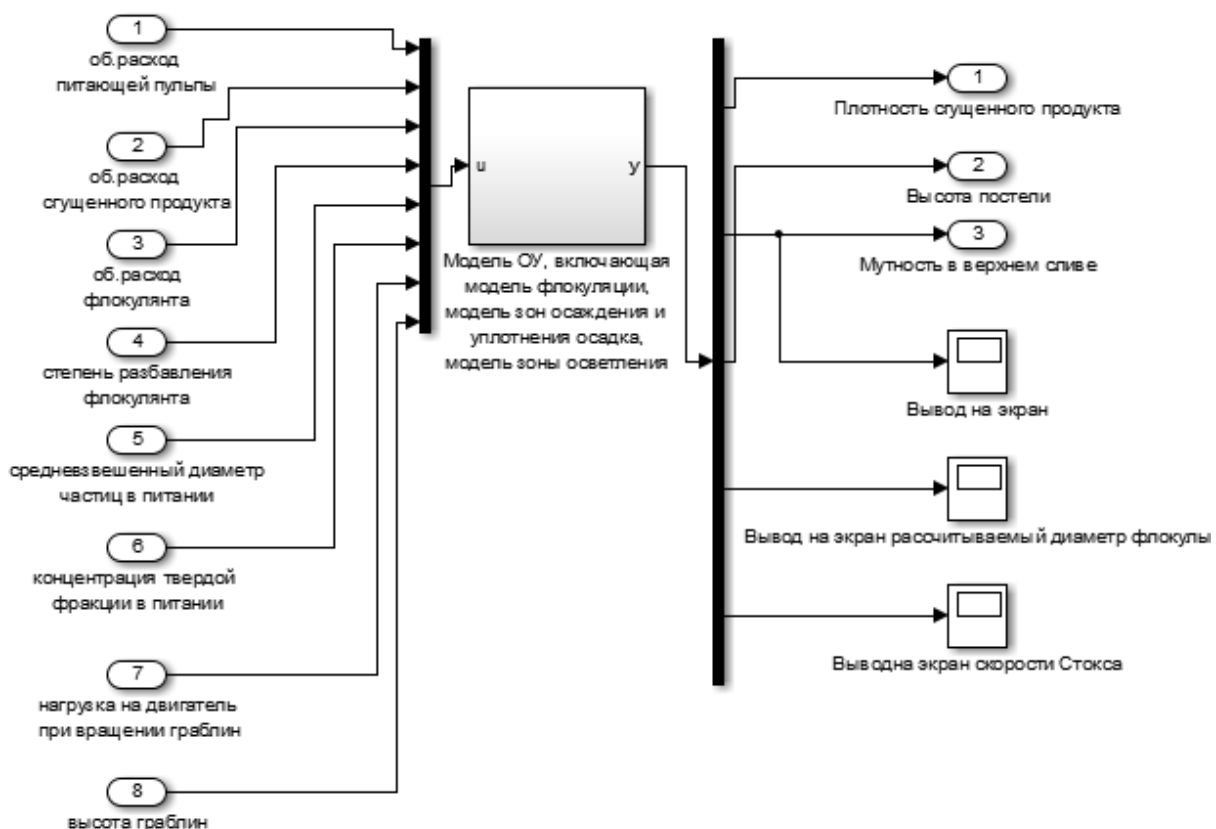


Рисунок 3.33 – Обобщенная модель сгустителя в среде Simulink MatLab

$x(t)$ – входные параметры модели (рисунок 3.33):

x_1 – объемный расход питающего потока в сгуститель;

x_2 – объемный расход сгущенного продукта;

x_3 – объемный расход флокулянта;

x_4 – объемный расход раствора на разбавление флокулянта;

x_5 – средневзвешенный диаметр частиц в питании;

x_6 – концентрация твердой фракции в питании;

x_7 – ток, потребляемый двигателем при вращении граблей;

x_8 – высота граблей;

$z(t)$ – выход линейного передаточного звена $H(s)$, $z(t)$ имеет такую же размерность, что и $x(t)$;

$v(t) = f(x(t))$ – нелинейная функция, преобразующая вектор входных данных $z(t)$, имеет такую же размерность, что и $y(t)$;

$y(t)$ – выход линейного передаточного звена $H(s)$.

$z(t)$ и $v(t)$ – внутренние переменные, которые служат входом и выходом СНЭ, соответственно.

Выходные параметры модели:

y_1 – содержание твердой фракции в сгущенном продукте;

y_2 – высота постели;

y_3 – содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителя.

Передаточные характеристики динамических линейных элементов входов и выходов модели исследуемого ОУ подробно описывались в работе [23].

3.8.3 Результат моделирования

На рисунках 3.34 - 3.37 представлены переходные характеристики по плотности нижнего продукта, уровню постели и содержанию твердой фракции в верхнем сливе при ступенчатом воздействии на входы сгустителя. На рисунках 3.38, 3.39 в виде трендов представлены сопоставления расчетов по обобщенной модели и архивных данных по параметрам «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» и «содержание твердого в сгущенном продукте».

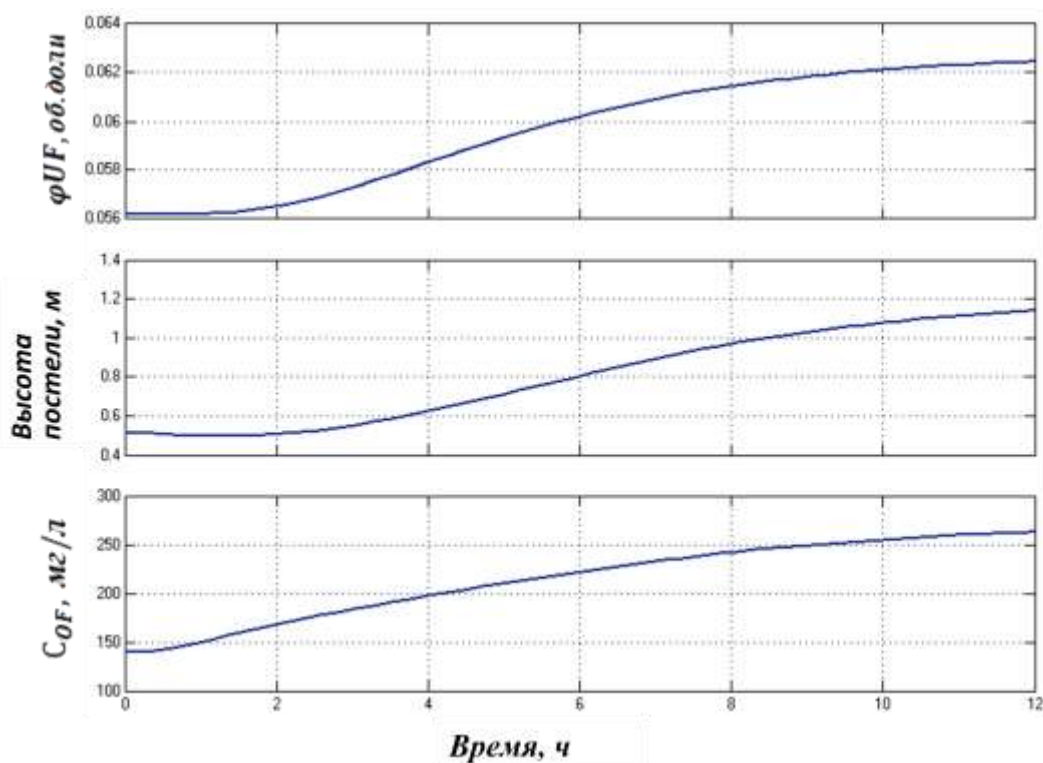


Рисунок 3.34 – Переходные характеристики контролируемых величин при изменении объемного расхода питания с 350 до 400 м³/ч

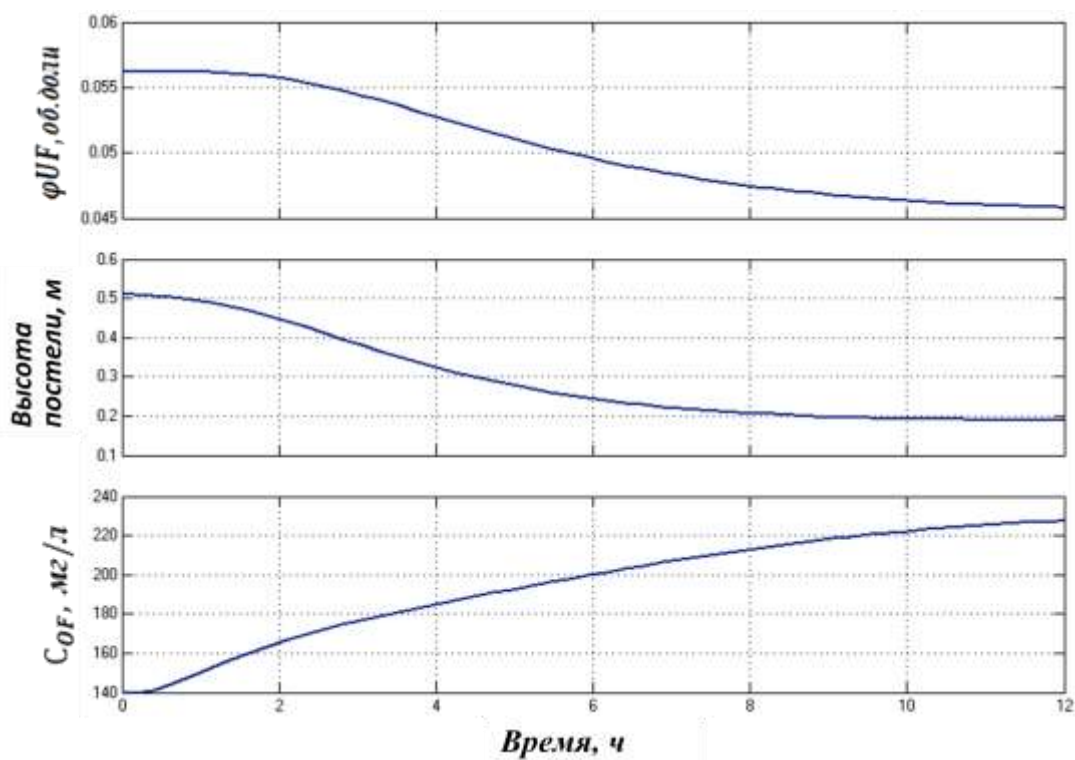


Рисунок 3.35 – Переходные характеристики контролируемых величин при изменении объемного расхода сгущенного продукта с 90 до 110 м³/ч

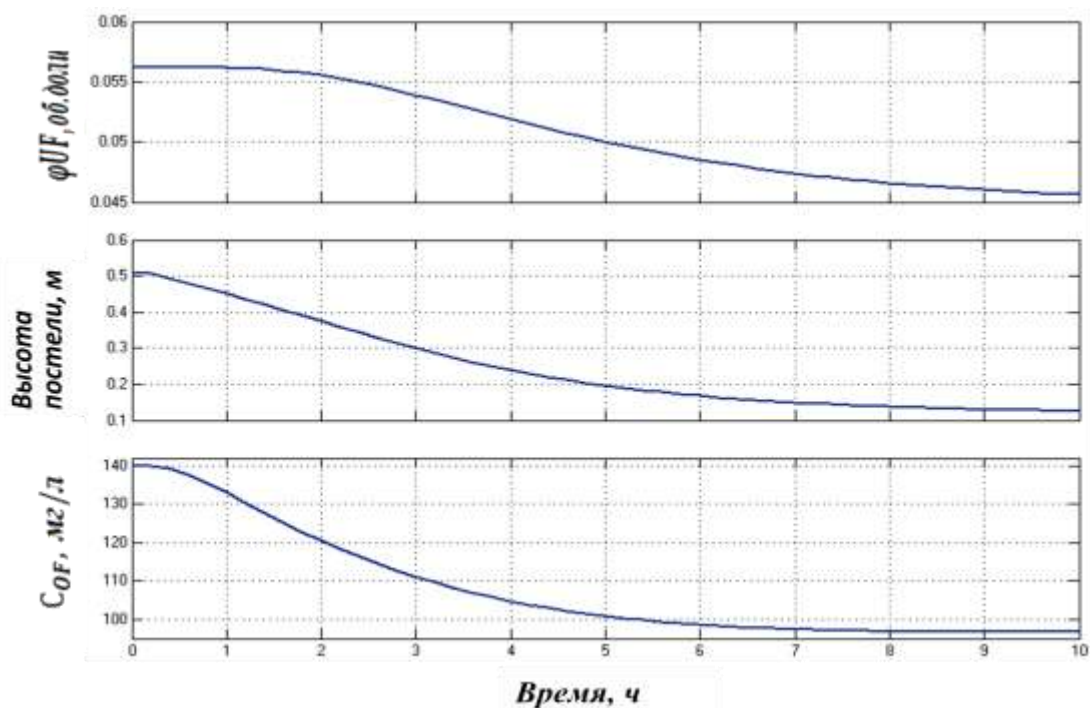


Рисунок 3.36 – Переходные характеристики контролируемых величин при изменении содержания твердой фракции в питающей пульпе с 0,0159 до 0,0139 об.долей

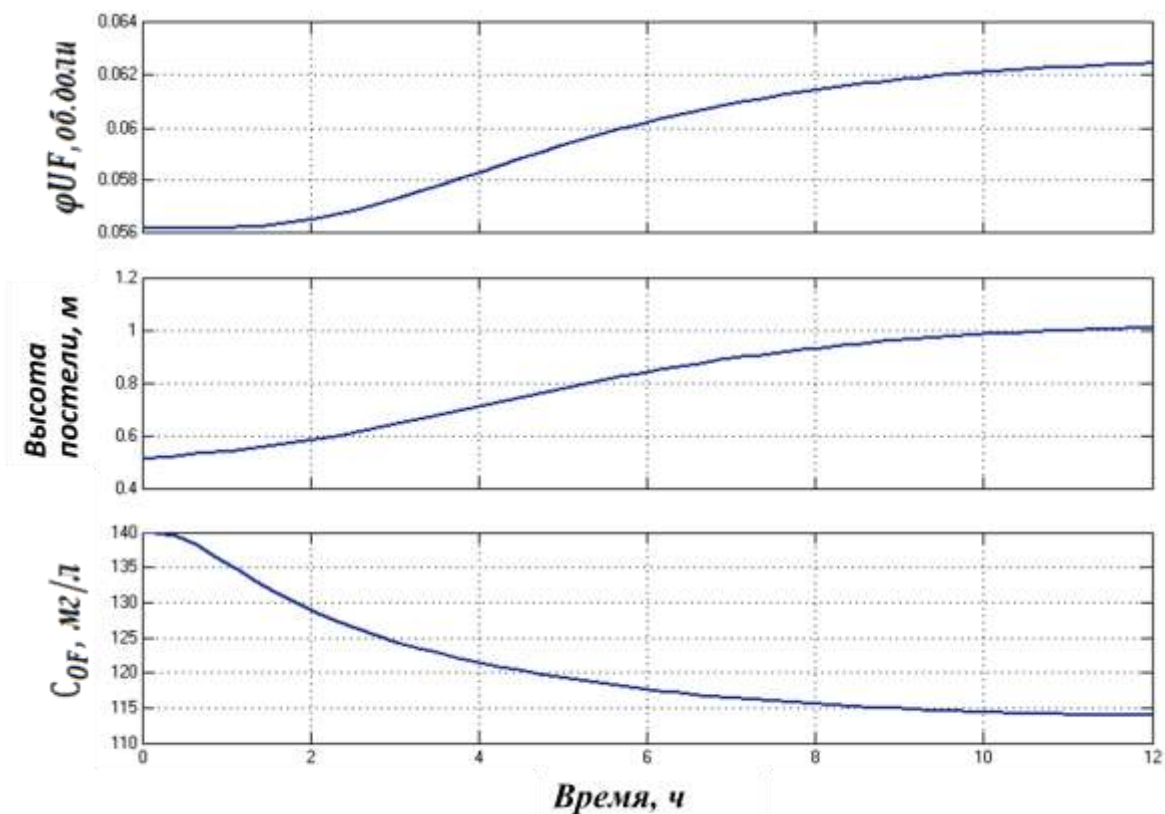


Рисунок 3.37 – Переходные характеристики контролируемых величин при уменьшении среднего размера частицы в питании на 10%

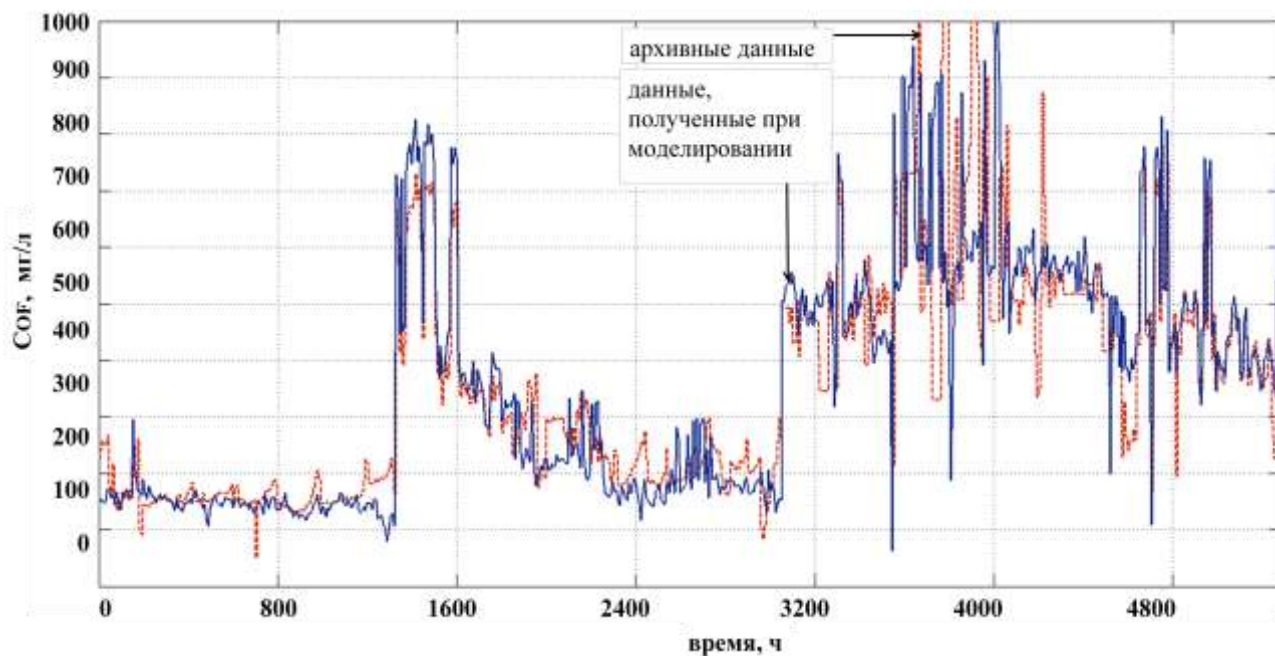


Рисунок 3.38 – Сопоставление результатов расчетов по обобщенной модели и архивных производственных данных по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе»

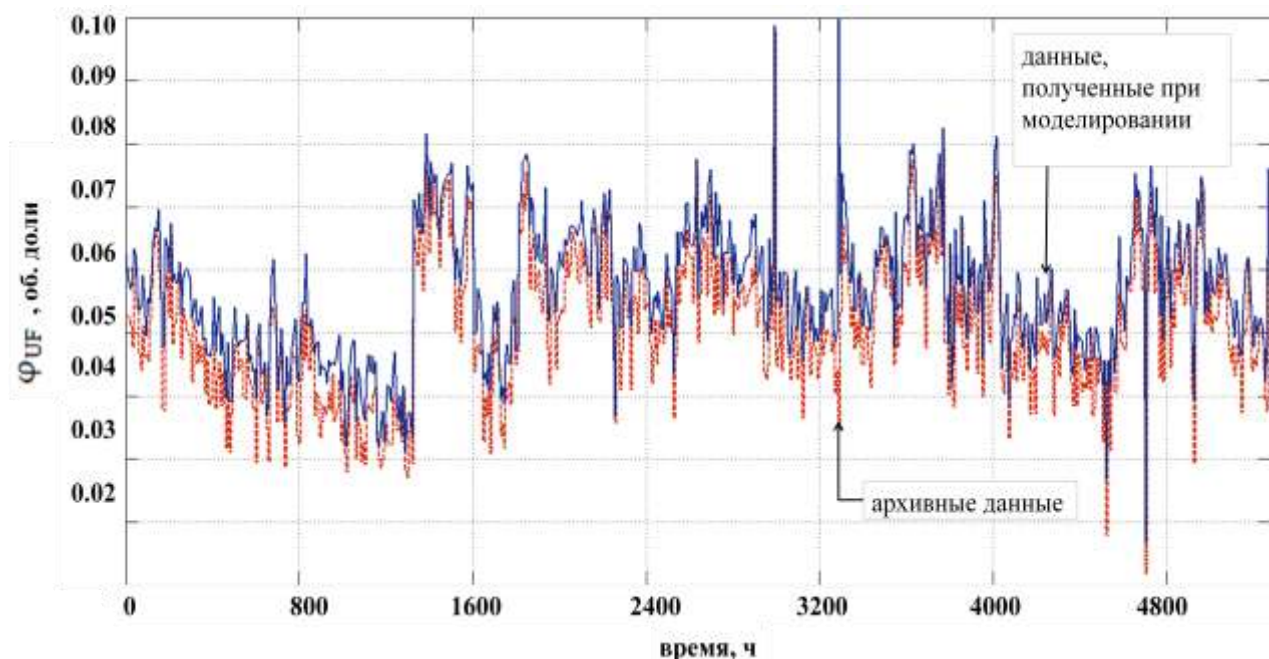


Рисунок 3.39 – Сопоставление результатов расчетов по обобщенной модели и архивных производственных данных по параметру «содержание твердой фракции в сгущенном продукте»

Целевыми параметрами при управлении сгущением КШ являются «содержание твердой фракции в сгущенном продукте» и «концентрация твердой фракции в верхнем сливе».

СКО расчетного значения концентрации твердой фракции в верхнем сливе равно 63 мг/л, СКО расчетного значения содержания твердой фракции в сгущенном продукте – 0.0087 об.долей.

Точность описания архивных производственных данных моделью оценивалась с помощью коэффициента множественной детерминации R^2 [100].

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_y^2} \quad (3.80)$$

где σ_{xy}^2 – дисперсия ошибки модели, σ_y^2 – дисперсия воспроизводимости наблюдений, включающая в себя дисперсию измерения.

Коэффициент множественной детерминации R^2 показывает насколько предсказание по модели лучше, чем предсказание по среднему значению отклика y . R^2 характеризует долю разброса отклика, описываемую регрессией

($1 \geq R^2 \geq 0$). Чем ближе коэффициент R^2 к единице, тем лучше описывает модель экспериментальные данные. R^2 может принимать и отрицательные значения, но это говорит о крайней неадекватности описания данных полученной моделью [100].

Коэффициент множественной детерминации R^2 для модели по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» равен 0.7002, по параметру «содержание твердой фракции в сгущенном продукте» – 0.7135.

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.

С помощью F-критерия Фишера проверяют, значимо ли остаточная дисперсия превышает оценку дисперсии ошибки отклика. С учетом того, что отношение дисперсий подчиняется F-распределению Фишера, вычисляют расчетное значение F-критерия [100].

Критерий Фишера рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{\sigma_{\bar{x}y}^2}{i \cdot \sigma_y^2} \quad (3.81)$$

$i = n - p - 1$ – количество степеней свободы дисперсии,

n – количество наблюдений,

$p = 8$ – количество факторов.

Расчетный критерий Фишера для параметра «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» равен 4.61×10^{-4} , для параметра «содержание твердой фракции в сгущенном продукте» – 5.95×10^{-4} .

Значения расчетных критериев Фишера для обоих параметров удовлетворяют условию $F > F_t$, где F_t – табличное значение критерия Фишера. Модель адекватная.

Ошибки моделирования являются проявлениями ошибок измерения. Используем измерительные приборы и соответствующие им классы точности рассмотрены в третьей главе, в разделе 3.3.1.

3.9 Выводы по третьей главе

В третьей главе проанализированы архивные производственные данные с помощью аналитического инструмента GE Proficy Troubleshooter, являющегося компонентом программной среды GE Proficy Csense. Получены статические характеристики целевого параметра «мутность верхнего слива сгустителя» от основных измеряемых параметров.

Проведен корреляционный анализ измеряемых параметров исследуемого ОУ.

Разработана обобщенная динамическая модель, включающая в себя модель агрегации твердой фазы, модель зоны стесненного осаждения и уплотнения осадка, модель зоны осветления. Обобщенная модель при расчете учитывает зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации. Структура динамической модели сгустителя представлена простой каскадной моделью Винера-Гаммерштейна и состоит из последовательно соединенных динамических линейных элементов, представленных в работе двумя апериодическими звеньями первого порядка, и статического нелинейного элемента, представленного стационарной нелинейной моделью ОУ.

Модель агрегации твердой фазы позволяет рассчитывать средний размер флокул, образующихся в процессе флокуляции в питающем стакане, в зависимости от объемного расхода флокулянта и его разбавления.

Модель зоны стесненного осаждения и уплотнения осадка решает задачу моделирования процесса осаждения твердой фракции, флокулированной суспензии в сгустителе - осветлителе, основанного на функциях проницаемости (стесненного осаждения) и эффективного сжатия твердого осадка, описывается строго вырожденным диффузионным уравнением с разрывами потока. Модель стесненного осаждения включает в себя: модель процесса флокуляции, поправочный коэффициент Лепле для расчета скорости Стокса в зависимости от числа Рейнольдса частицы, коэффициент формы флокулы, переменную площадь поперечного сечения цилиндрической и цилиндроконической частей сгустите-

ля. Модель зоны стесненного осаждения и уплотнения осадка решена с помощью алгоритма, разработанного в программном продукте MatLab.

Модель зоны осветления строится на основе теории осаждения Кинча, дополненной поправочными коэффициентами. В расчет модели введен поправочный коэффициент, позволяющий учитывать зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации. Рассчитан в программном комплексе ANSYS Fluent поправочный коэффициент для исследуемого ОУ, позволяющий компенсировать ошибки моделирования при расчете концентрации твердой фазы в верхнем сливе сгустителя при использовании на входе модели моночастицы. В качестве вспомогательных программных инструментов для построения модели зоны осветления использовались Curve Fitting Toolbox от MatLab и программа «Excel Population Balance Model», разработанная в ходе проекта «AMIRA p266 project: Improving thickening technology», спонсором которого является компания РУСАЛ, в которой получен диапазон распределения флокул по размерам после процесса флокуляции и дефлокуляции.

Обобщенная модель устанавливает функциональную зависимость между значениями параметров «содержание твердой фракции в сгущенном продукте» и «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» и измеряемыми входными параметрами и имеет высокую степень сходимости. 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.

ГЛАВА 4 СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ СГУСТИТЕЛЯМИ НА БАЗЕ АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА

Передел «Сгущения и промывки КШ» представлен цепочкой параллельно расположенных сгустителей и промывателей (часть из которых находится в работе). В настоящий момент управление питанием сгустителей осуществляется вручную, путем регулирования задвижек, расположенных на линиях с РК. На параллельно работающих сгустителях примерно одинаковый объемный расход, что не верно, т.к. с увеличением застарания сгустителя/нарастания шлама на граблинах необходимо перераспределять питающие потоки между сгустителями.

Алгоритм распределения потока КШ между параллельно работающими сгустителями на основе клонального отбора направлен на:

- поддержание средней плотности нижнего продукта сгустителей в заданном диапазоне;
- уменьшение суммарного объемного расхода твердой фракции с верхним сливом сгустителей.

Теоретические основы алгоритма клонального отбора, являющегося алгоритмом ИС, описаны в первой главе.

Используемые СУ с трудом справляются с медленной динамикой и многосвязностью параметров, присущей сгустителям.

Синтезированная САУ параллельно работающими сгустителями имеет в своем составе регулятор с прогнозирующей моделью (МРС регулятор) на основе обобщенной модели агрегата для каждого сгустителя на ветке сгущения. МРС регулятор для каждого сгустителя подбирает наилучшие управляющие воздействия. Стратегии модельно-прогнозирующего управления позволяет учитывать медленную динамику процесса, которая может медленно меняться со временем под действием таких факторов, как накопление осадка в резервуаре-сгустителе. Прогнозирующая модель учитывает эти изменения, используя

встроенный модельно-адаптационный алгоритм. Алгоритм предиктивного управления позволяет поддерживать строгий контроль, независимо от меняющейся динамики [24].

Предлагаемая САУ содержит блок оптимизации на основе алгоритма параллельного поиска оптимума функции, имеющей не единственное решение, позволяет распределять питающий поток между параллельными сгустителями. Алгоритм, реализованный в блоке оптимизации, подбирает наилучшие управляющие воздействия на линии питания в параллельно работающие сгустители на перделе сгущения и промывки КШ.

Для решения задачи оптимизации используется среда MatLab [84, 85, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107].

Общая структурная схема принципа построения САУ параллельными сгустителями на базе MPC регуляторов с прогнозирующей моделью для каждого сгустителя и блока оптимизации с алгоритмом распределения питающего потока между параллельными сгустителями представлена на рисунке 4.1.

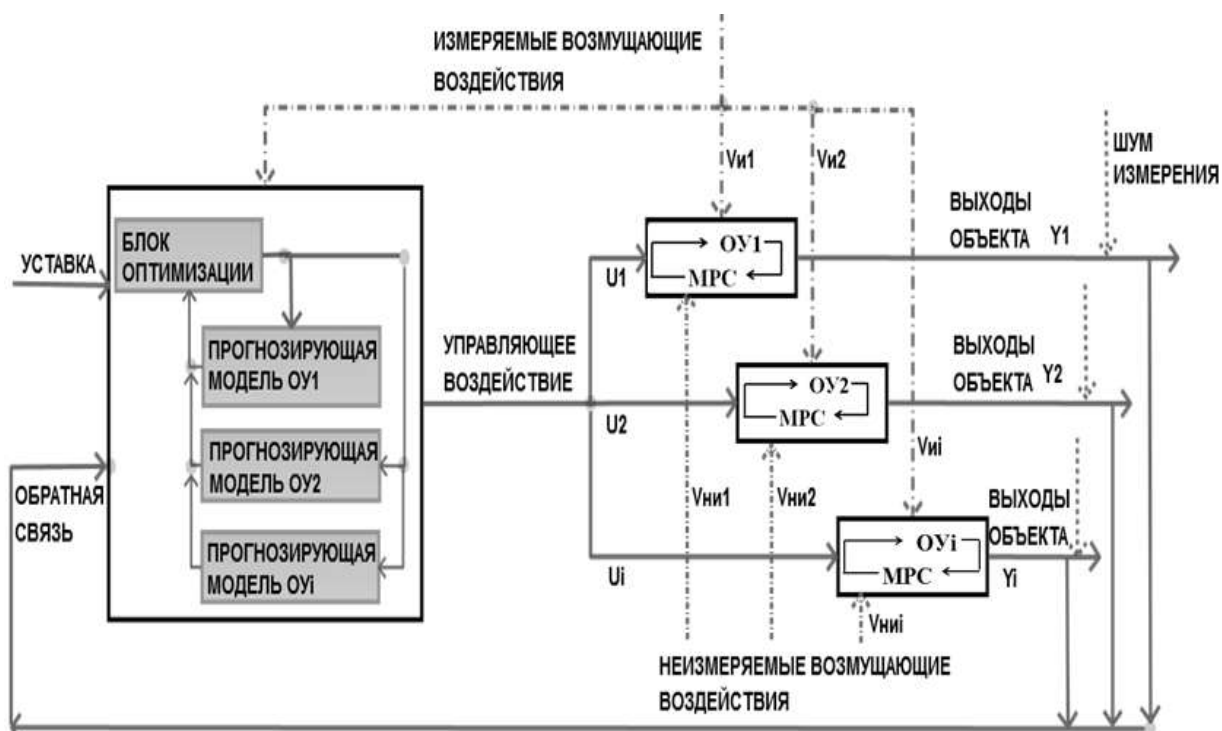


Рисунок 4.1 – Структурная схема САУ

4.1 Система управления сгустителем на базе прогнозирующей модели объекта управления и предиктивного регулятора

Разработанная и описанная в третьей главе обобщенная динамическая модель ОУ учитывает зарастание днища и граблин шламом. В параллельно работающих сгустителях процесс зарастания происходит неодинаково во времени, но параметры «нагрузка на двигатель при вращении граблин», «высота граблин», учитываемые в разработанной модели, помогают отслеживать зарастание сгустителя.

Использование САУ с регулированием по прогнозирующей модели, дает возможность описать действия ОУ на несколько шагов вперед с учетом таких особенностей, как входные и выходные ограничения, измеряемые и не измеряемые возмущения, зашумленность измеряемых параметров и т. д. [24, 108, 109].

В схеме модели ОУ с MPC модель процесса используется для двух целей:

- явного предсказания будущего поведения процесса;
- расчета оптимальных корректирующих действий управления.

MPC состоит из комбинации следующих элементов: модели процесса, оптимизатора, а также фильтра оценивания состояния.

Регулятором производятся вычисления таким образом, чтобы рассчитанные управляющие воздействия отвечали прогнозируемым значениям выходных переменных объекта управления. После того, как вычисления окончены, регулятор подает на систему управляющие воздействия, которые выполняются до следующего шага. После этого в регулятор поступают новые измеренные значения, и полностью пересматривается расчет. Такой алгоритм непрерывно повторяется [24, 110].

Пересчет значений в регуляторе на каждом шаге очень важен для качества управления. Он необходим для того, чтобы предотвратить накопление статической ошибки, реагировать на возникающие возмущения, а также учитывать

запаздывания на выходе ОУ и предугадывать возможные ограничения для снижения нежелательных последствий [24, 111, 112, 113].

Математическая модель ОУ в пространстве состояний представлена в дискретном виде. Дискретно – разностное уравнение позволяет учитывать динамику процесса. Уравнения, описывающие модель, подробно представлены и описаны в работе [24, 110].

В прогнозирующую модель входят [24, 110]:

- модели технологического процесса, входами которой являются управляющие переменные, измеряемые возмущения и неизмеряемые возмущения [24];
- модели, генерирующей неизмеряемые возмущения [24].

Подробное описание принципа работы предиктивного регулятора на базе прогнозирующей модели, внутренние настройки MPC представлены в работе [24].

4.1.1 Интеграция предиктивного регулятора в систему управления

Синтез СУ сгустителем на базе MPC регулятора осуществлен в среде GE Proficy Architect, который является компонентом программного комплекса GE Proficy CSense.

Общую структуру СУ, имеющей в своем составе MPC регулятор, для каждого сгустителя можно представить в следующем виде:

$$Y = f(V_{и}, V_{ни}, U) \quad (4.1)$$

где Y – вектор выходных регулируемых величин, $V_{и}$ – вектор измеряемых возмущающих воздействий, $V_{ни}$ – вектор не измеряемых возмущающих воздействий, U – вектор управляющих воздействий.

- Вектор возмущающих воздействий для каждого из сгустителей включает: объемный расход питающей пульпы; содержание твердой фракции в питающей пульпе; распределение частиц по размерам в питании; рН пульпы; температура питающей пульпы; размер образующихся в процессе флокуляции флюкул;

- Вектор управляющих воздействий включает: объемный расход сгущенного продукта; объемный расход флокулянта;
- Вектор выходных регулируемых величин включает: содержание твердой фракции в сгущенном продукте; концентрацию твердой фазы в верхнем сливе.

Уставки процесса задаются в виде констант.

На рисунках 4.2, 4.3 представлена СУ одним сгустителем на базе прогнозирующей модели ОУ и MPC регулятора. Модель ОУ для каждого сгустителя реализована в GE Proficy Architect в виде скрипта на языке C# в блоке DotNetScripting, который переименован как Plant_Model в реализуемом проекте. С помощью блоков Delay, TimeDelay_01 реализуется транспортное запаздывание для указанных в блоке FieldSelector_01 параметров (рисунок 4.2), например, при поступлении объемного расхода флокулянта в питающий стакан флокула достигает максимального стабильного размера по истечении 10 с для исследуемого процесса.

На рисунке 4.3 реализован MPC регулятор. Блок MPC регулятора (ModelPredictiveControlBlock_01) является стандартным блоком библиотеки Architect'a. MPC моделирует динамику процесса в статическом состоянии. Для запуска разработанного проекта на исполнение необходимо производить обмен данными через OPC с помощью блоков OPC_Client_Source и OPC_Client_Sink. OPC_Client_Sink передает в SCADA - систему рекомендуемые уставки управляющих воздействий и производит управление процессом сгущения в сгустителе полностью в автоматическом режиме. Блок OPC_Client_Source считывает значения измеряемых параметров с ОУ (в реализуемом проекте на момент тестирования СУ блок OPC_Client_Source записывает предыдущие значения параметров, вышедших с регулятора на предыдущем шаге). Для организации ОС через OPC используется MatriconOPC, который позволяет считывать и записывать значения параметров, которые будут подаваться в ОС, проект работает в режиме реального времени.

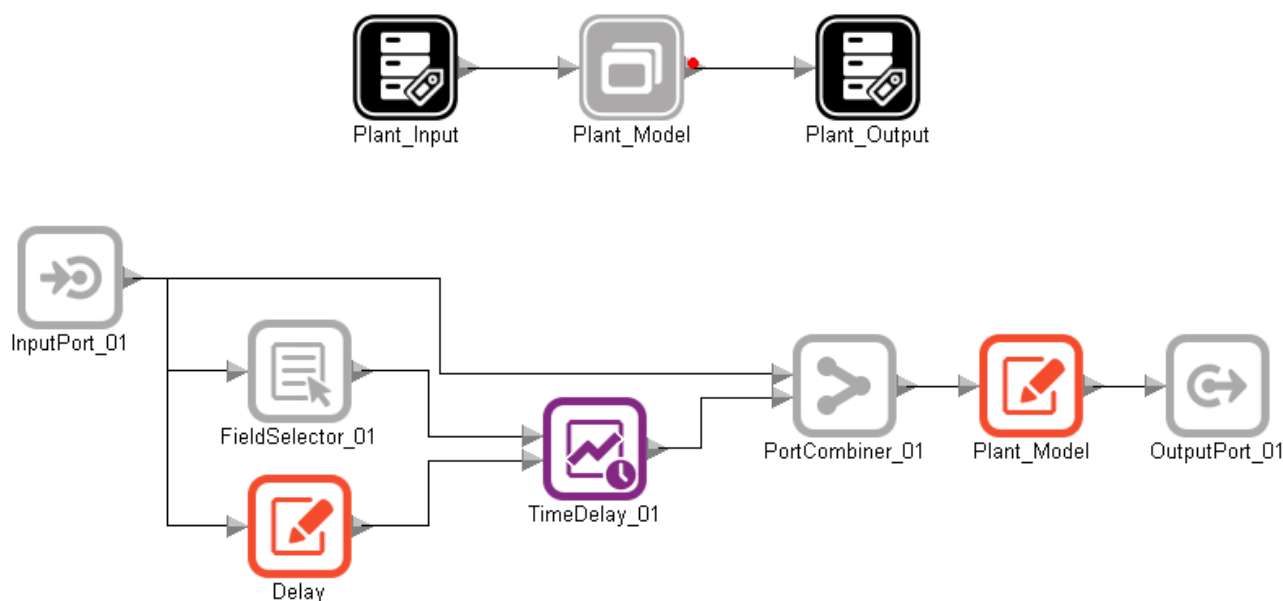


Рисунок 4.2 – Модель ОУ в GE Proficy Architect

В блоках SPs, MVs задаются уставки процесса и управляющие воздействия соответственно. Для регулятора предусмотрено переключение между ручным и автоматическим управлением (MPC_On), которое активируется с помощью MatriconOPC Explorer.

При реализации регулятора используется Controller_Superblock для возможности редактировать имена сигналов, чтобы избежать их конфликтов в дальнейшем.

Процесс сгущения КШ характеризуется широким диапазоном рабочих условий, поэтому для управления процессом на всем диапазоне используется несколько регуляторов для каждой модели предсказания: во время работы происходит переключение между регуляторами в каждой рабочей точке, которая описывается линейной моделью ОУ.

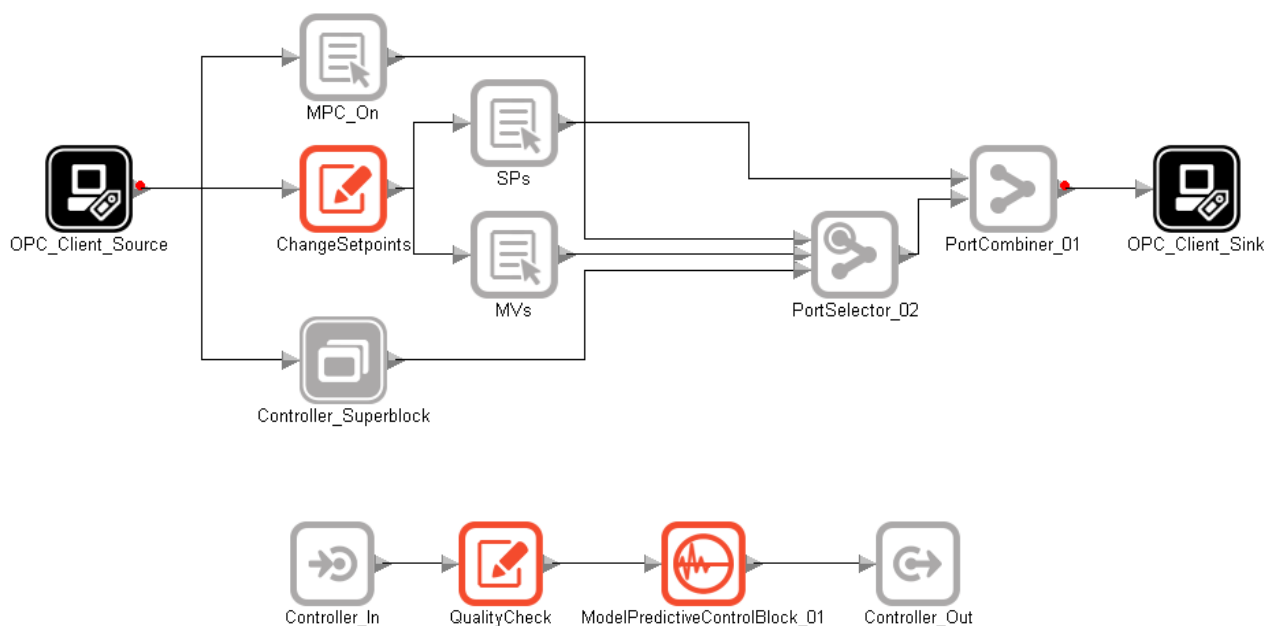


Рисунок 4.3 – MPC регулятор в GE Proficy Architect

На рисунках 4.4, 4.5 представлены переходные процессы целевых параметров: концентрации твердой фракции в верхнем сливе сгустителя и содержания твердого в сгущенном продукте при управлении с помощью предиктивного регулятора и возмущении по параметру объемный расход питающей пульпы с 400 до 450 м³/ч. На рисунках 4.6-4.7 – переходные характеристики управляющих переменных: объемного расхода сгущенного продукта, объемного расхода флокулянта и объемного расхода жидкости на разбавление флокулянта.

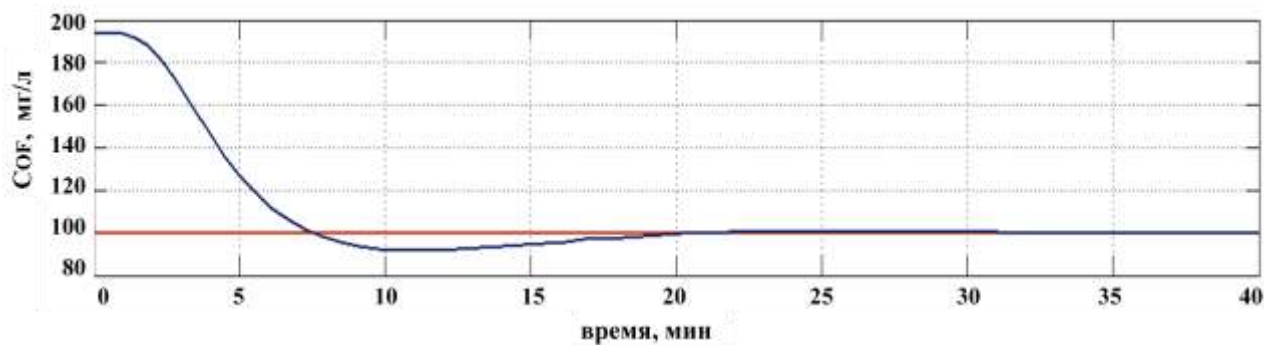


Рисунок 4.4 – Переходный процесс изменения концентрации твердой фракции в верхнем сливе при изменении объемного расхода питания с 350 до 400 м³/ч

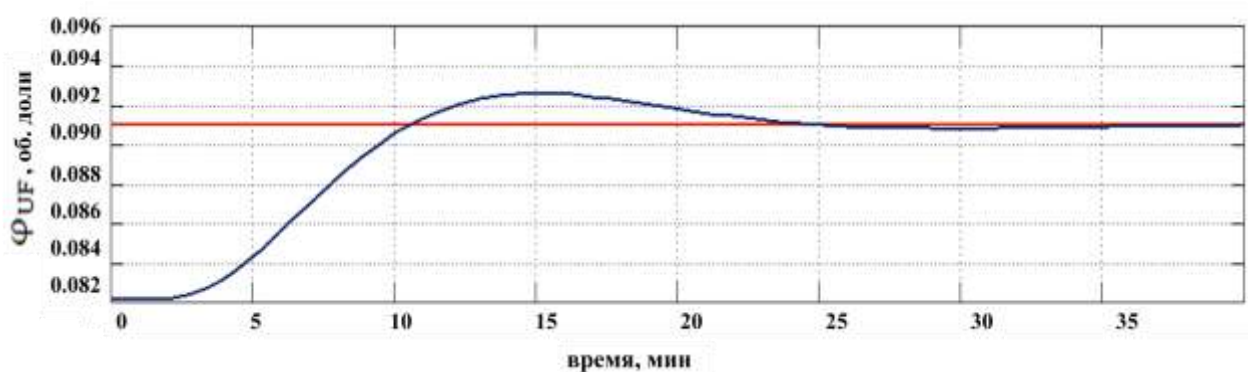


Рисунок 4.5 – Переходный процесс изменения содержания твердого в сгущенном продукте при изменении объемного расхода питания с 350 до 400 м³/ч

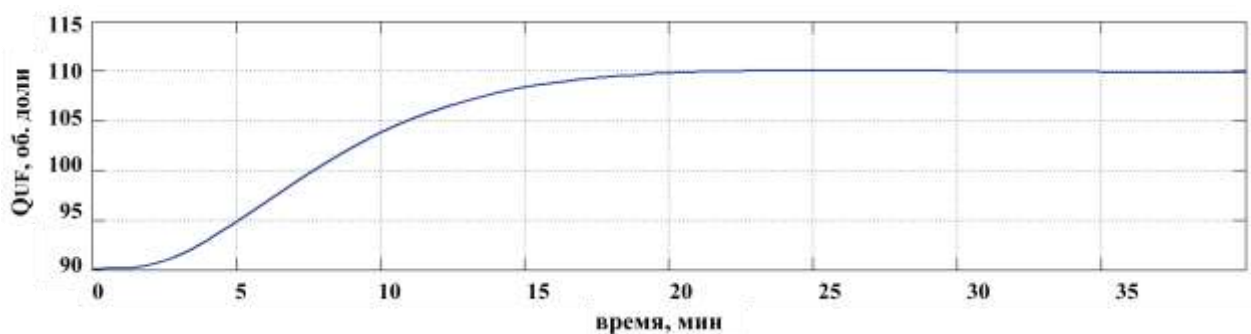


Рисунок 4.6 – Переходный процесс изменения управляющего параметра «объемный расход сгущенного продукта» при изменении объемного расхода питания с 350 до 400 м³/ч

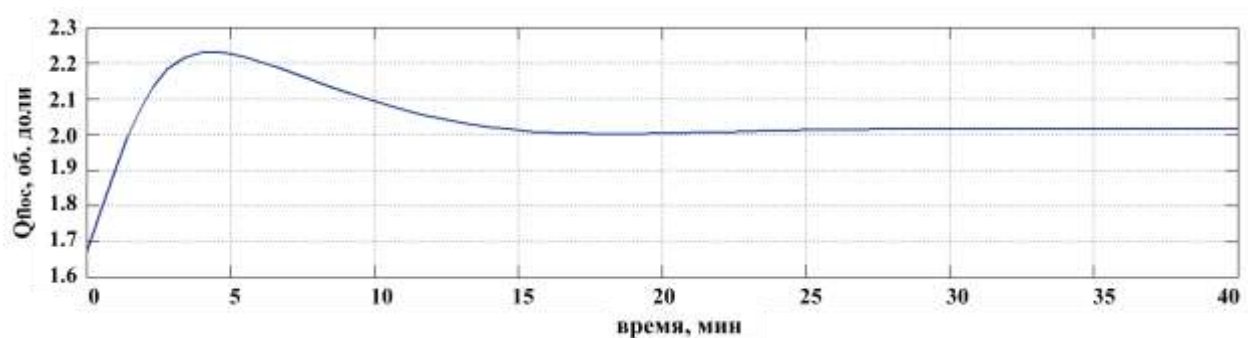


Рисунок 4.7 – Переходный процесс изменения управляющего параметра «объемный расход флокулянта» при изменении объемного расхода питания с 350 до 400 м³/ч

4.2 Алгоритм распределения питающей пульпы между параллельными сгустителями

Блок оптимизации (рисунок 4.1) на основе алгоритма клонального отбора позволяет определять оптимальные значения объемных расходов питающей пульпы на каждый из сгустителей, работающих параллельно на ветке сгущения, с учетом всех особенностей ведения процесса сгущения: измеряемых и не измеряемых возмущающих воздействий, входных и выходных ограничений и т.д.

Блок оптимизации на основе алгоритма является надстройкой на верхнем уровне над существующей SCADA-системой и контролирует процесс сгущения. Положение УУ на базе алгоритма в СУ параллельными сгустителями показано на рисунке 4.8.

В САУ на базе MPC регуляторов с прогнозирующей моделью для каждого сгустителя и блока оптимизации с алгоритмом распределения питающего потока между параллельными сгустителями для блока оптимизации векторы возмущающих воздействий, возможные управляющие воздействия, выходные регулируемые величины представлены следующими параметрами:

- Вектор возмущающих воздействий для каждого из сгустителей включает: $Q_{F\Sigma}$, м³/ч - суммарный объемный расход питающей пульпы из РК на ветке сгущения, H_{bed} , м - высоту постели в сгустителе, I , А - ток, потребляемый двигателем из сети (растет пропорционально моменту нагрузки на двигатель при вращении граблин), H_{rake} , см - высоту граблин, φ_0 , об.доли - содержание твердой фракции в питающей пульпе, PSD - распределение частиц по размерам в питании, рН пульпы, T , °С - температуру питающей пульпы, D_{floc} , мкм - размер образующихся в процессе флокуляции флокул;
- Вектор управляющих воздействий U включает: Q_F , м³/ч - объемный расход питающей пульпы в сгуститель;

- Вектор выходных регулируемых величин Y включает: φ_{UF} , об. доли - содержание твердой фракции в сгущенном продукте, C_{OF} , мг/л - концентрация твердой фазы в верхнем сливе.



Рисунок 4.8 – Положение УУ на базе алгоритма распределения питающей пульпы между параллельными сгустителями в СУ

Изменения возмущающих воздействий носят случайный характер, например, содержание твердой фракции в питающей пульпе, распределение частиц по размерам в питании зависят от перерабатываемого на производстве сырья, соотношения поступающих на переработку сырьевых потоков, предшествующих стадий дробления и размола, такие параметры как рН пульпы, температура питающей пульпы зависят от стадии выщелачивания, и как результат данные параметры влияют на вязкость суспензии, размер образующихся в про-

цессе флокуляции флокул, высоту постели в сгустителе, а, следовательно, на момент нагрузки на двигатель при вращении граблин и их высоту. Также возмущающими факторами являются характеристики флокулянта: тип, активность, схема приготовления флокулянта.

Критерий оптимальности для решения поставленной цели может быть выражен как:

$$J = \frac{Q_{ТВ\ OF_OY}}{Q_{ТВ\ F}} \quad (4.2)$$

где $Q_{ТВ\ OF}$ – массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом, со всей ветки сгущения, $Q_{ТВ\ F}$ – суммарный объемный расход твердой фракции, поступающей на ветку сгущения с пульпой. $Q_{ТВ\ OF}$, $Q_{ТВ\ F}$ рассчитываются при $i=1\dots 5$ как:

$$Q_{ТВ\ OF_OY} = Q_{OF1_OY1} C_{OF1_OY1} + Q_{OF2_OY2} C_{OF2_OY2} + \dots + Q_{OFi_OYi} C_{OFi_OYi} \quad (4.3)$$

$$Q_{ТВ\ F} = Q_{F1} \cdot \varphi_{F1} + Q_{F2} \cdot \varphi_{F2} + \dots + Q_{Fi} \cdot \varphi_{Fi} \quad (4.4)$$

$$Q_{OF1} = Q_{F1} - Q_{UF1} \quad (4.5)$$

$$Q_{OF2} = Q_{F2} - Q_{UF2} \quad (4.6)$$

...

$$Q_{OFj} = Q_{F\Sigma} - \sum_{i=1}^4 Q_{Fi} - Q_{UFj}, j = 5 \quad (4.7)$$

Синтезируемая САУ позволит стабилизировать содержание твердой фракции в сгущенном продукте в диапазоне 0.085-0.095 об.долей и минимизировать суммарное содержание твердой фракции в верхнем сливе сгустителей со всей ветки сгущения, распределяя питающий поток между параллельными сгустителями за счет минимизации критерия оптимальности (J^*).

$$J^* = \min_U [J(U, V)] \text{ при следующем ограничении:} \quad (4.8)$$

$$\varphi_{UF_min} \leq \varphi_{UF} \leq \varphi_{UF_max} \quad (4.9)$$

4.2.1 Алгоритм клонального отбора

Блок оптимизации обеспечивает поиск оптимальных управляющих воздействий на базе алгоритма клонального отбора. Алгоритмы на основе ИИС для решения задач оптимизации и ранее применялись для технологических

процессов [28, 39, 52, 114, 115]. Алгоритм поиска глобального минимума может быть представлен в виде блок-схемы (рисунок 4.9).

Алгоритм использует форменное пространство, где вещественные числа представлены в двоичном коде $x_i = \text{code}(U_i)$, т.е. каждый управляющий параметр сгустителя представлен массивом бит длиной $L = 4$ бита. Следовательно, длина массива бит для хранения всех управляющих параметров в двоичном коде $np = L \cdot i$, где i – число управляющих параметров. Тогда $X_{\text{vect}} = [x_1, x_2, \dots, x_i] = [\text{code}(U_1), \text{code}(U_2), \dots, \text{code}(U_i)]$. На математической числовой оси вещественные числа образуют непрерывное множество, т. е. два числа могут сколь угодно близко находиться друг к другу, и на любом отрезке находиться бесконечное множество значений чисел. В машинном же представлении количество возможных значений чисел конечно. Таким образом, в техническом устройстве вещественное число/управляющий параметр (U_i) заменяется машинным кодом, образующим конечное дискретное множество — каждый код оказывается представителем целого интервала значений континуума и равен: $N_{\text{osnov}} = 2L = 24 = 64$. Число элементов для всех управляющих воздействий в двоичном коде в дискретном пространстве набора настроек определяется в диапазоне $[0 \dots 2np]$, который является диапазоном изменения вектора X_{vect} , в котором содержатся все переменные/управляющие параметры ОУ.

Таким образом, поиск оптимальных управляющих параметров происходит в X_{vect} , а впоследствии параметры преобразуются из двоичного кода в десятичную систему с помощью операций «fix» и «mod», далее полученные нормированные значения управляющих воздействий ($U_i \text{norm}$) масштабируются в соответствии с заданными системными единицами как:

$$U_i = U_{i \text{ min}} + \frac{(U_{i \text{ max}} - U_{i \text{ min}})}{N_{\text{osnov}}} U_i \text{norm} \quad (4.10)$$

где $U_{i \text{ max}}$ – это верхняя граница/ограничение по изменению параметра U_i , $U_{i \text{ min}}$ – нижняя граница/ограничение.

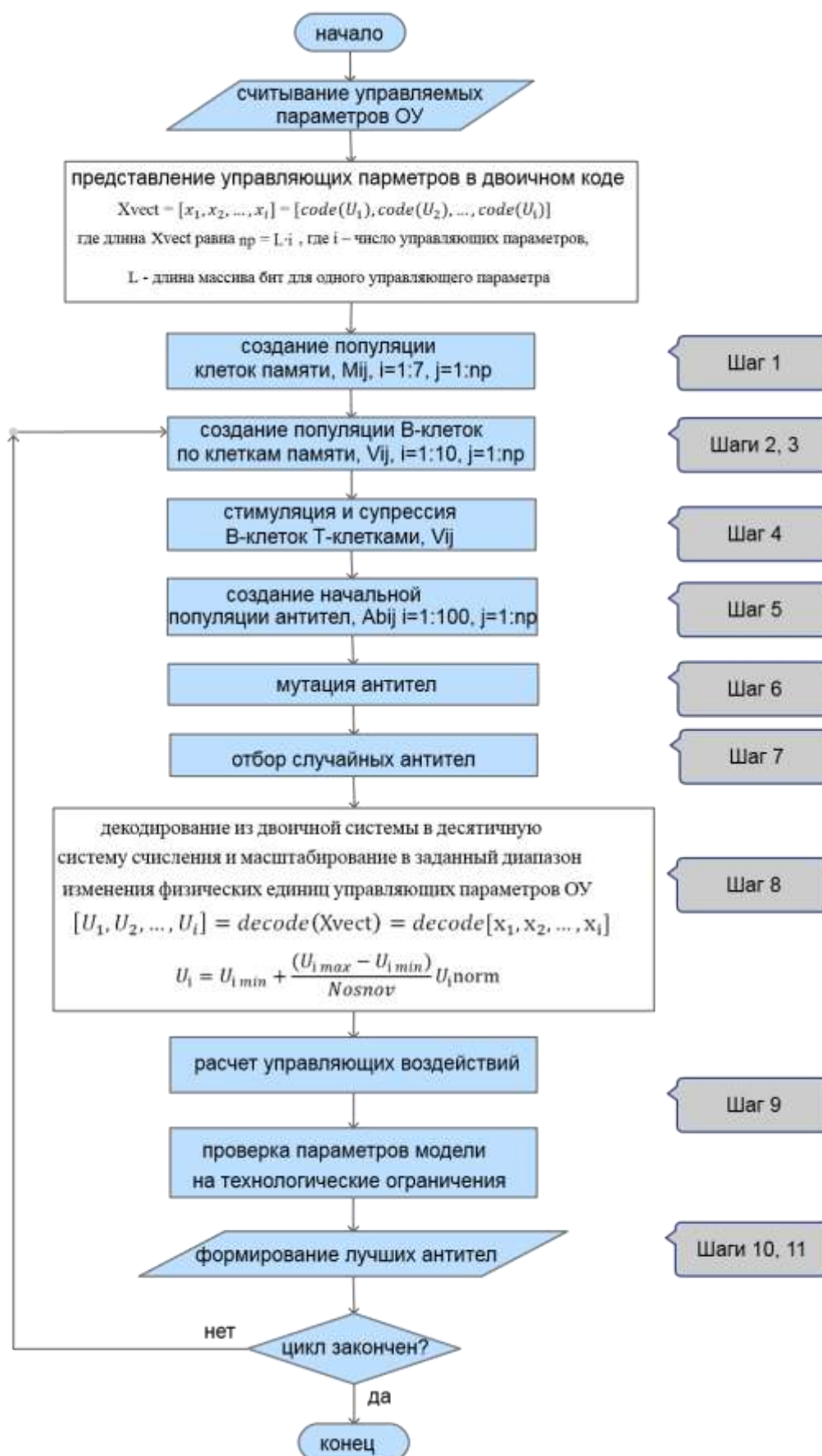


Рисунок 4.9 – Блок-схема алгоритма клонального отбора

В пространстве X_{vect} целевая функция имеет множество локальных минимумов, но предложенный алгоритм, относящийся к классу алгоритмов параллельного поиска, справляется с поиском глобального минимума.

Шаг 1. Вне цикла создается матрица случайных клеток памяти (популяция) «М» размером $[i, j]$, где $i = 1:7$ – количество структур в массиве «М», $j = 1:\text{nr}$. В каждую структуру при $i = 1:7$ и $j = 1$ закладываются начальные значения критерия J_{max} и показателя степени аффинности M_{aff} к текущему минимальному антигену J . Для всего массива «М» при $j = 1:\text{nr}$ создаются прототипы клеток, представленные в двоичном коде, с помощью оператора «rand (0 |1)». Таким образом, массив «М» - наилучший вектор поиска набора настроек на начальный момент времени.

Шаг 2. Аналогично популяции клеток памяти вне цикла создается матрица В-клеток (начальный набор В-лимфоцитов) размером $[i, j]$, где $i = 1:10$ – количество структур в массиве «В», $j = 1:\text{nr}$. В каждую структуру при $i = 1:7$ и $j = 1$ закладываются начальные значения критерия J_{max} и показателя степени аффинности V_{aff} к текущему минимальному антигену J . Для всего массива «В» при $j = 1:\text{nr}$ создаются прототипы В-клеток, представленные в двоичном коде, с помощью оператора «rand (0 |1)». Массив «В» - глобальный вектор поиска (массив структур V).

Шаг 3. В процессе работы алгоритма создается популяция В-клеток, характеризующаяся большим показателем аффинности/степенью близости, чем начальный набор В-клеток. Алгоритм создания популяции В-клеток по клеткам памяти «М» состоит из 2-х частей:

- Аффиннитет клетки памяти сравнивается с аффиннитетом В-клетки, если выполняется условие $M_{\text{aff}} > V_{\text{aff}}$, то структура массива «М»/клетка памяти массива «М» встраивается на i -ое место В-клетки, а В-клетка сдвигается на место $i+1$. Таким образом, формируется массив структур $V_{i,j}$ по массиву структур «М»: $V_{i,j} := M_{i,j}$. Проверка останова программы: если значения всех элемен-

тов массива структур $V_{i,j}$ близки друг к другу с определённым допуском φ , то оставить поиск, иначе – переходим к следующему подшагу;

- Для разнообразия при поиске случайно генерируются новые три В-клетки для $i = 8:10$ с помощью оператора «rand (0 |1)».

Шаг 4. Для предотвращения неконтролируемого размножения В-клеток, а также для поддержки перспективных В-клеток необходимо выполнять алгоритм стимуляции и супрессии В-клеток Т-клетками, который заключается в сравнении значений пептида встраиваемых клеток с пептидом клеток из массива $V_{i,j}$. Если наблюдается высокое сходство/низкая различность, то i – структура/клетка массива $V_{i,j}$ удаляется из популяции.

Шаг 5. За один цикл каждая В-клетка способна спродуцировать 10 антител. Количество циклов устанавливается в начале работы алгоритма. Таким образом, массив антител Ab состоит минимум из 100 структур: $Ab [100, np]$

Шаг 6. Происходит мутация пептидов антител/ инвертирование бит в двоичном коде в соответствии с шаблоном вероятности «изменчивости» T , где $T = [0.8; 0.5; 0.3; 0.2; 0.1; 0.05; 0.01]$.

Шаг 7. Отбираются 10 случайных мутировавших антител с помощью операции «ground» для дальнейшего сражения с антигеном.

Шаг 8. Декодирование из двоичной системы в десятичную систему счисления и масштабирование в заданный диапазон изменения физических единиц управляющих параметров сгустителя: $[U_1, U_2, \dots, U_i] = \text{decode}(X\text{vect}) = \text{decode}[x_1, x_2, \dots, x_i]$

Шаг 9. Борьба с текущим антигеном (Ag) и вычисление аффинитета к нему состоит из следующих этапов:

Расчёт управляющих воздействий, который проходит по 10 вариантам настроек/случайным мутировавшим антителам, декодированным на шаге 8. Производится проверка параметров модели на технологические 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 $i = 1:10$.

Вычисление самого сильного Ag на текущий момент. Самый сильный антиген определяет минимальное значение J по поставленной задаче. Если $Ab_i < J_{\min}$, то $J_{\min} := Ab_i$. Вычисление аффинитета критерия J отобранных мутировавших структур Ab_i и структур V_i , где $i = 1:10$ к минимальному значению J_{\min} как: $Ab_{i\text{aff}} = \frac{J_{\min}}{Ab_i \cdot J}$, $V_{i\text{aff}} = \frac{J_{\min}}{V_i \cdot J}$. Результат вычисления показывает степень близости антитела и антигена.

Шаг 10. Отобранные антитела/клоны сортируются по степени их аффинности к антигену с помощью метода пузырька:

для $i = 1:(10 - 1)$ происходит проверка:

если $clones_y(i, 1) > clones_y(i + 1, 1)$

то меняем местами значения антител, значения их аффинности и значения пептидов антител через временные переменные, например:

$time_value = clones_y(i, 1);$

$clones_y(i, 1) = clones_y(i + 1, 1);$

$clones_y(i + 1, 1) = time_value;$

Шаг 11. Формируются клетки памяти на основе лучших антител. Сохранение первых 7 отсортированных на шаге 10 лучших антител происходит в 7 клетках памяти массива структур M .

Шаг 12. Переход к шагу 3.

Когда поиск завершён, регулятор выдает управляющие воздействия (объемные расходы питающей пульпы в каждый из сгустителей на ветке сгущения) существующим локальным СУ сгустителями, которые функционируют с найденными настройками до следующего пересчета.

4.2.2 Результат работы алгоритма клонального отбора

Алгоритма параллельного поиска оптимума функции протестирован в среде MatLab. Результат работы алгоритма в процессе поиска глобального ми-

нимума при определенных параметрах питающей пульпы представлен на рисунке 4.10.

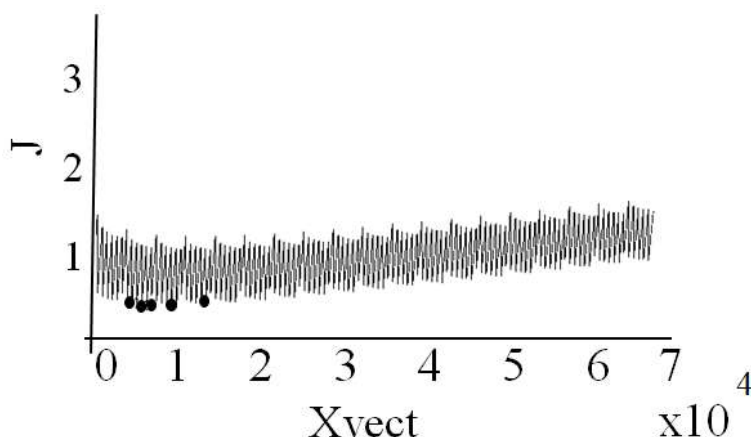


Рисунок 4.10 – Поиск минимума критерия оптимальности с помощью лгоритма клонального отбора

4.3 Система управления параллельно работающими сгустителями на базе алгоритма клонального отбора

САУ параллельными сгустителями реализована в программном пакете GE Proficy CSense и представляет собой интеллектуальную надстройку над базами оперативных и исторических производственных данных предприятия. Модуль Architect позволил обеспечить моделирование и оптимизацию в режиме реального времени. Сервис Action Object Manager и Report Server позволили разместить и запустить в реальном времени разработанное решение. Модуль Report Server формирует Run-time оболочку продукта.

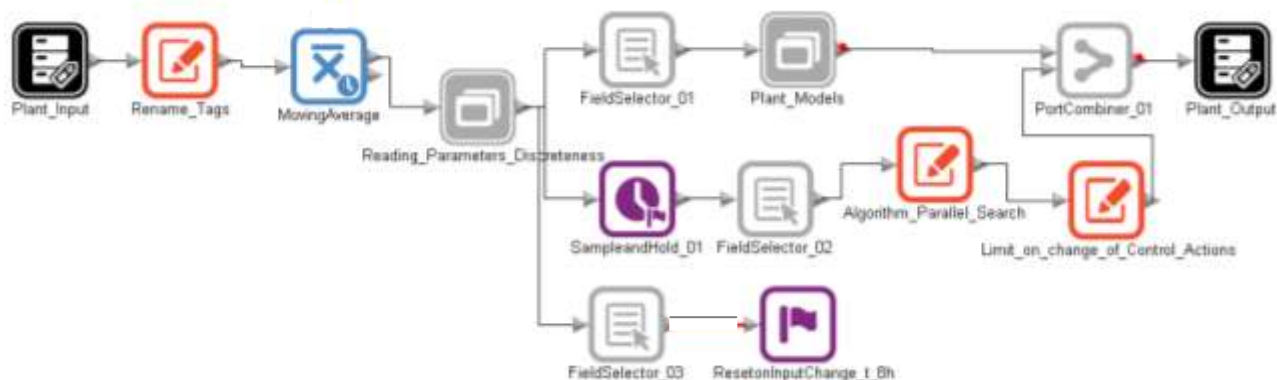


Рисунок 4.11 – СУ параллельными сгустителями. Общий вид

На рисунке 4.11 представлена СУ параллельными сгустителями на базе алгоритма распределения питающего потока между аппаратами в зависимости от степени их зарастания и зашламливания.

Скриптовый блок `Rename_Tags` является блоком подготовки данных и отвечает за соответствие имен тегов с ОУ и имен параметров в блоке моделей ОУ. Все скриптовые блоки реализованы с помощью языка `C#`. Блок скользящего среднего `Moving_Average` используется для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных тенденций временных рядов. С помощью блока `Reading_Parameters_Discreteness` усредняются часто измеряемые параметры к параметрам, измеряемым с большей дискретностью. Содержание блока `Reading_Parameters_Discreteness` представлено на рисунке 4.12, где блок `Sample and Hold` фиксирует считанные/рассчитанные значения и передает последнее зафиксированное значение/массив значений далее на обработку и расчет, когда срабатывает триггер `Resear Input Change` по заранее прописанному условию.

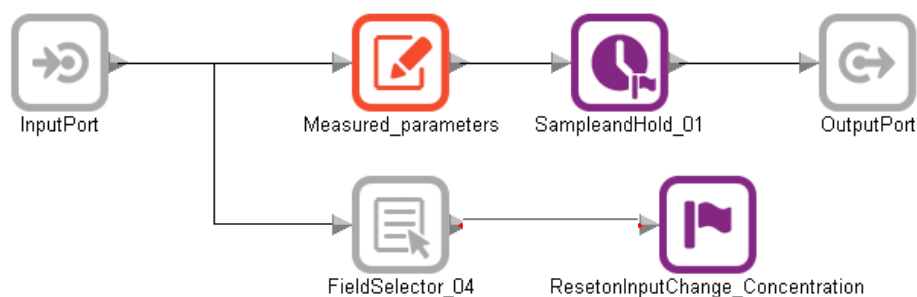


Рисунок 4.12 – Содержание блока `Reading_Parameters_Discreteness`

Блок `Plant_Models` является подсистемой, которая содержит в себе модели управления для каждого сгустителя с предиктивными регуляторами, принцип работы и интеграции в программную среду которых описан в разделах 4.1, 4.1.1. Алгоритм клонального отбора реализован в скриптовом блоке `Algorithm_Parallel_Search`. Блок `Limit_on_change_of_Control_Actions`, реализованный в скриптовом блоке, позволяет рассчитывать коридор оптимизации, т.е. на рассчитываемые по алгоритму оптимизации параметры Q_{fi} накладываются ограничения с целью не допустить сильных колебаний управляющих парамет-

ров при каждом расчете. Если $Q_{fi+1} - Q_{fi} < 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, то $Q_{fi+1} = Q_{fi}$. Перерасчет объемных расходов питающей пульпы 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.

Программный пакет GE Proficy CSense позволяет переобучать/дообучать модели в режиме оффлайн с помощью блока Offline Trainer или в режиме реального времени с помощью блока Online Trainer. Общий вид блочной схемы для обучения моделей ОУ с помощью тренера (Offline_Trainer) представлен на рисунке 4.13.

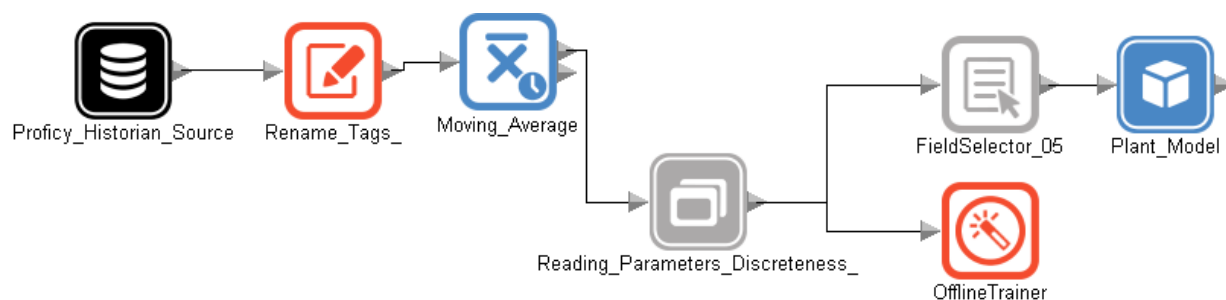


Рисунок 4.13 – Общий вид блочной схемы для обучения моделей ОУ с помощью тренера (Offline_Trainer)

Блок Plant_Model представляет собой шаблон подсистемы Plant_Models, изображенной на рисунке 4.11.

Любой набор блоков или проект можно использовать как шаблон и выдавать эти шаблоны другим пользователям с определенным доступом. Функция Publish Analytic защищает интеллектуальную собственность, заложенную в шаблоне, и позволяет использовать сохраненный шаблон, например, при переобучении.

4.3.1 Результат работы системы управления параллельно работающими сгустителями

На рисунках 4.14-4.18 представлены сопоставленные архивные данные и данные, полученные при работе САУ на базе прогнозирующих моделей сгустителей.

телей и блока оптимизации по параметру «объемный расход питающей пульпы».

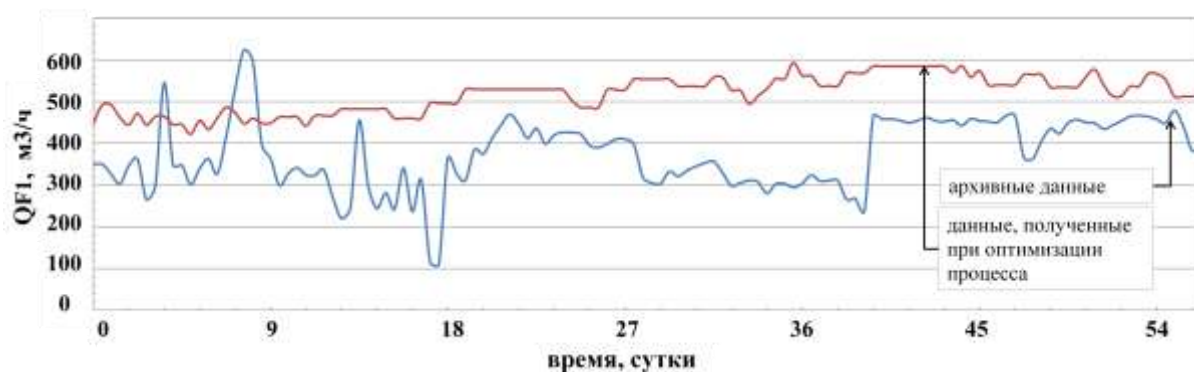


Рисунок 4.14 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «объемный расход питающей пульпы в сгуститель №1»

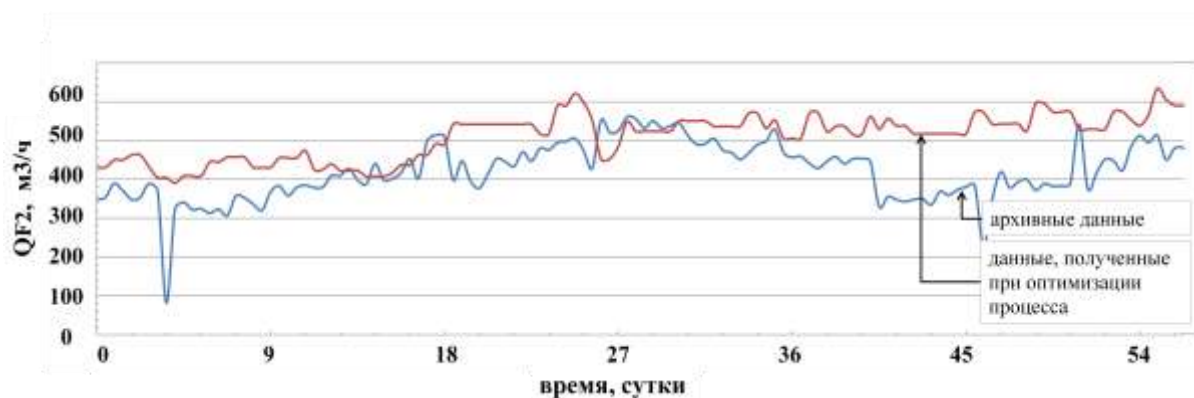


Рисунок 4.15 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «объемный расход питающей пульпы в сгуститель №2»

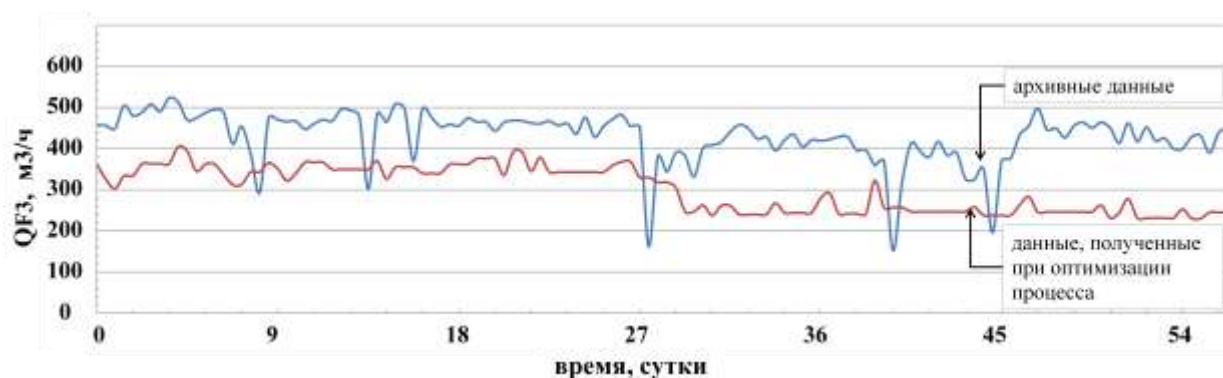


Рисунок 4.16 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «объемный расход питающей пульпы в сгуститель №3»

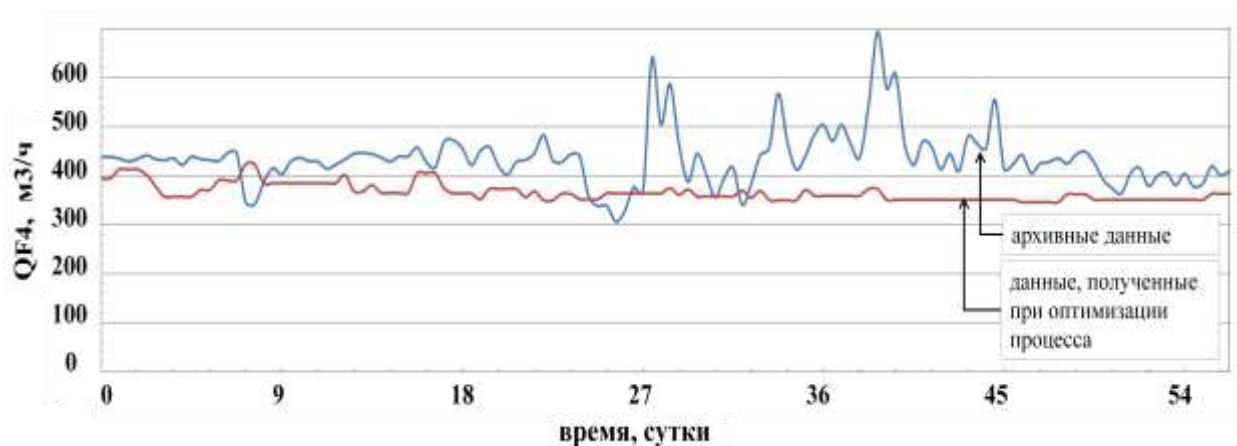


Рисунок 4.17 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «объемный расход питающей пульпы в сгуститель №4»

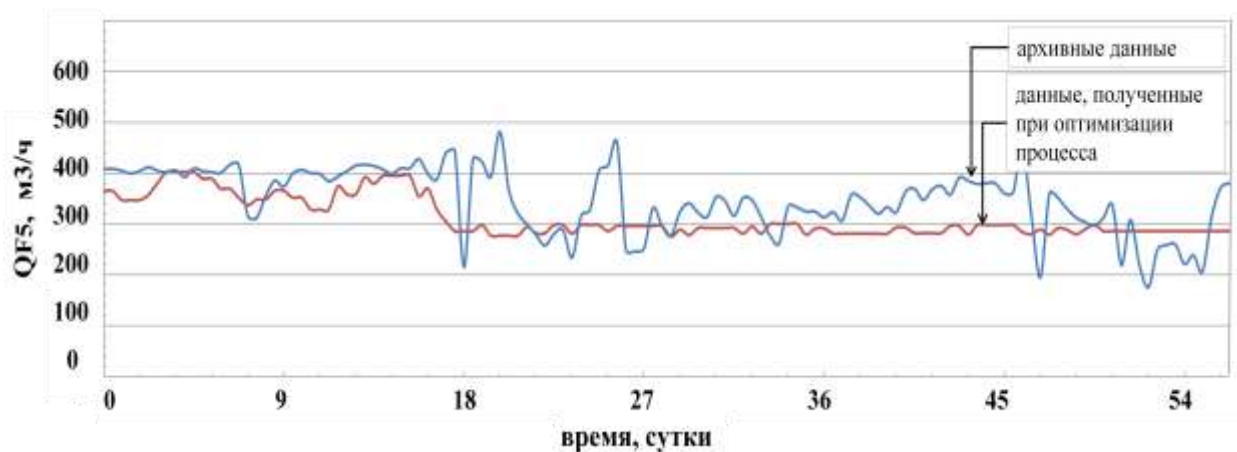


Рисунок 4.18 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «объемный расход питающей пульпы в сгуститель №5»

На рисунках 4.19, 4.20 сопоставлены архивные данные и данные, полученные при оптимизации процесса сгущения по целевым параметрам «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» и «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения.

Гистограммы разброса архивных значений и значений, полученных после оптимизации процесса, представлены на рисунках 4.21-4.24 соответственно для параметров «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» и «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения.

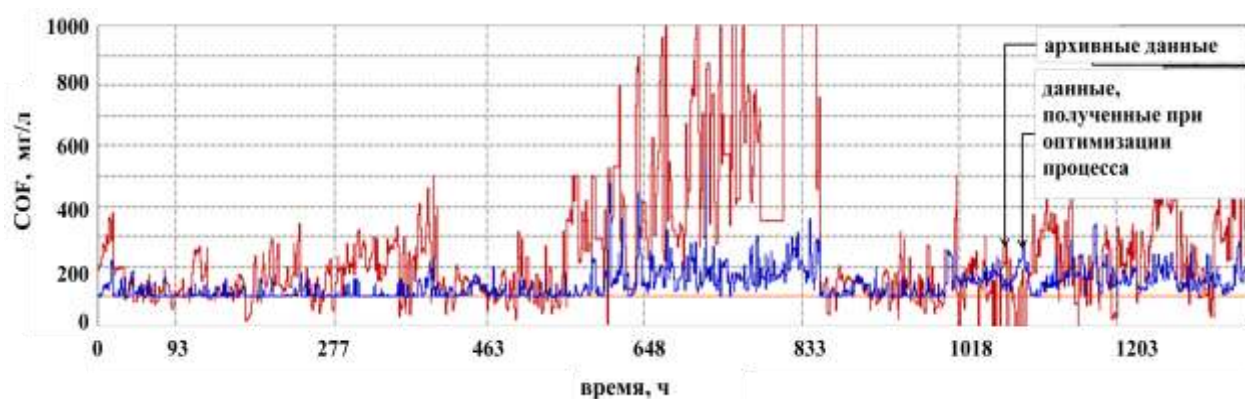


Рисунок 4.19 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» на выходе с ветки сгущения

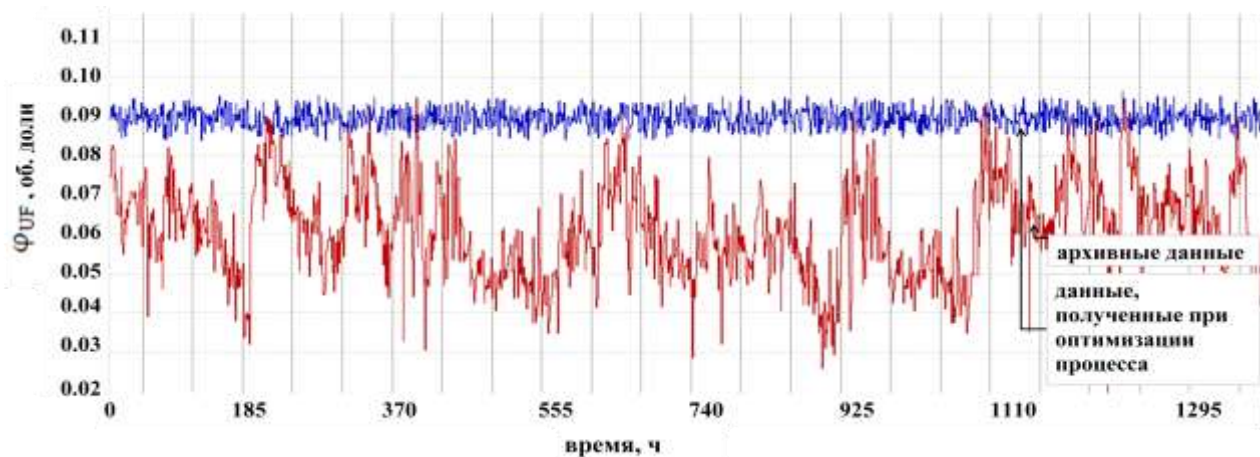


Рисунок 4.20 – Сопоставление архивных данных и данных, полученных при оптимизации процесса, по параметру «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения

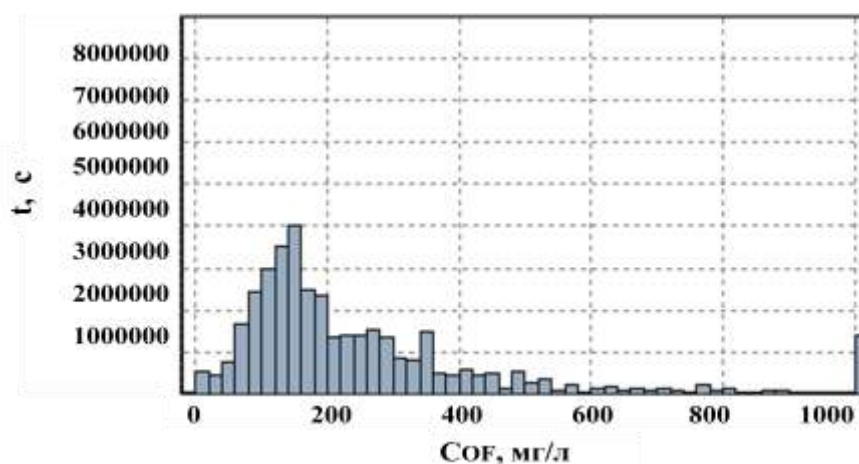


Рисунок 4.21 – Гистограмма разброса архивных значений по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» на выходе с ветки сгущения

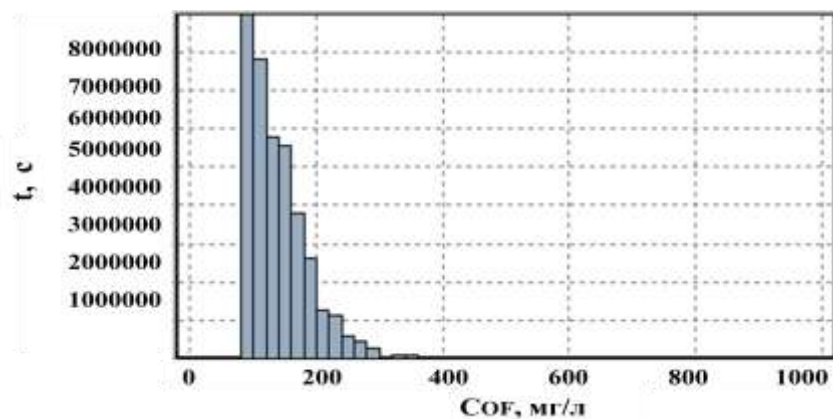


Рисунок 4.22 – Гистограмма разброса значений по параметру «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» на выходе с ветки сгущения после оптимизации процесса

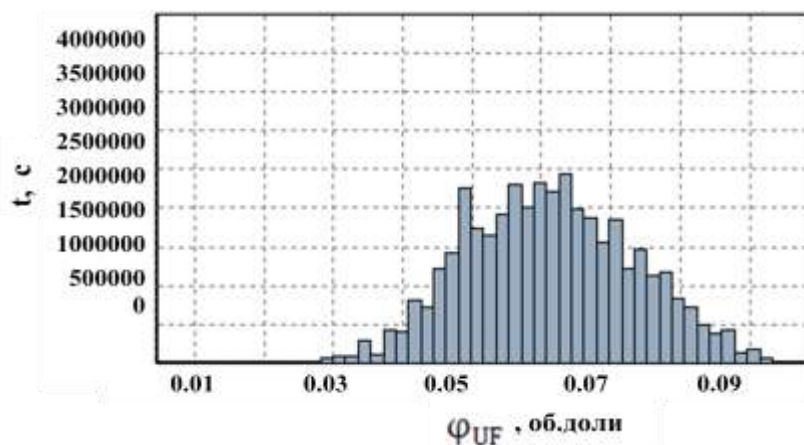


Рисунок 4.23 – Гистограмма разброса архивных значений по параметру «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения

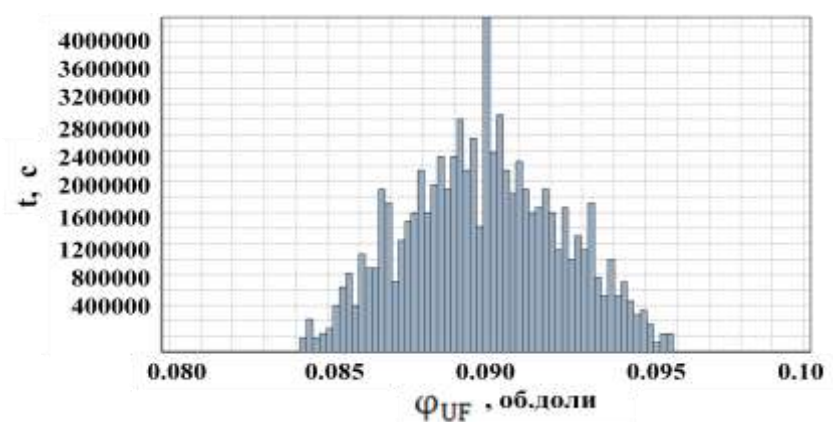


Рисунок 4.24 – Гистограмма разброса значений по параметру «содержание твердого в сгущенном продукте» на выходе с ветки сгущения после оптимизации процесса

Графики на рисунке 4.25 показывает суммарный массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом с ветки сгущения, до и после оптимизации процесса в условиях меняющихся исходных характеристик пульпы.

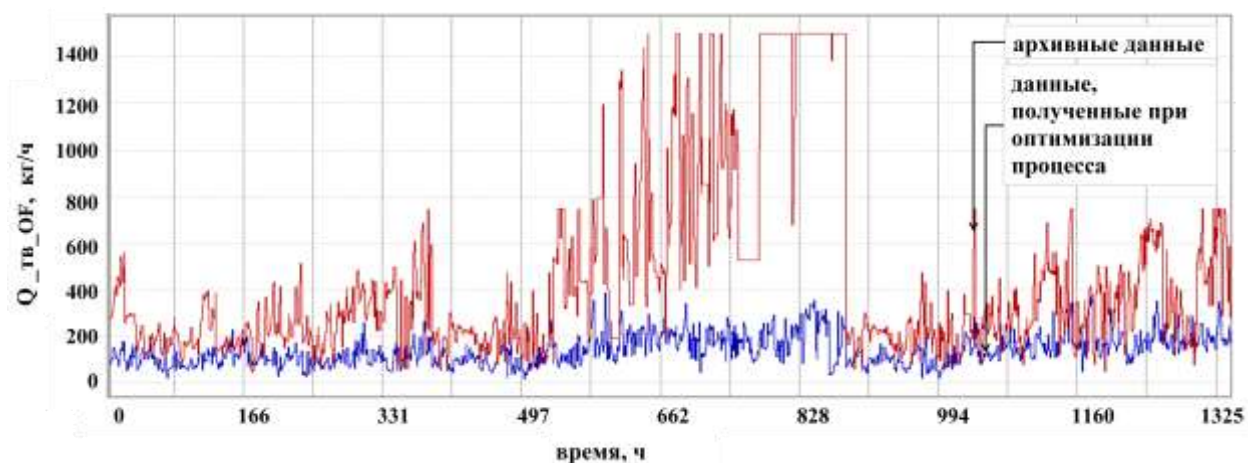


Рисунок 4.25 – Суммарный массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом с ветки сгущения, до и после оптимизации процесса в условиях меняющихся исходных характеристик пульпы

Управление распределением питающего потока между параллельно работающими сгустителями на базе САУ с прогнозирующей моделью для каждого сгустителя и блоком оптимизации на основе алгоритма клонального отбора позволяет стабилизировать содержание твердого в нижнем продукте в диапазоне 0.085-0.095 об.долей, что соответствует $272-304 \text{ кг/м}^3$, минимизировать суммарный массовый расход твердой фракции, выносимой с верхним сливом, в среднем на 180 кг/ч.

4.4 Выводы по четвертой главе

В четвертой главе синтезирована САУ параллельно работающими сгустителями на переделе сгущения и промывки КШ.

САУ включает в себя регуляторы с прогнозирующей моделью (MPC) для каждого из сгустителей и блок оптимизации на основе алгоритма клонального отбора, который позволяет перераспределять питающий поток между сгустите-

лями и поддерживать содержание твердой фракции в сгущенном продукте на выходе с ветки сгущения в диапазоне 0.085-0.095 об.долей и минимизировать суммарный массовый расход твердого с верхним сливом.

Автоматическое управление на базе предиктивной модели ОУ и MPC регулятора позволяет подбирать наилучшие управляющие воздействия по параметрам «объемный расход сгущенного продукта», «объемный расход флокулянта» и «объемный расход жидкости на разбавление флокулянта» для поддержания целевых параметров в заданном диапазоне: уставки по параметрам «концентрация твердой фракции в верхнем сливе» и «содержание твердого в сгущенном продукте» – 100 мг/л и 0.09 об.долей соответственно.

Для управления процессом на всем диапазоне используется несколько регуляторов для каждой модели предсказания, т.к. процесс сгущения КШ характеризуется широким диапазоном рабочих условий: во время работы происходит переключение между регуляторами в каждой рабочей точке, которая описывается линейной моделью ОУ.

Алгоритм параллельного поиска оптимума функции протестирован в среде MatLab. Синтез и тестирование на базе архивных производственных данных САУ параллельными сгустителями реализованы в среде GE Proficy Architect, который является компонентом программного комплекса GE Proficy CSense.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненных исследований:

1 Выявлены основные влияющие факторы на кинетику процессов сгущения КШ. Сделан обзор существующего оборудования для обезвоживания металлургических пульп, подробно рассмотрены сгустители четырех типов: традиционные сгустители, высокопроизводительные сгустители, сгустители с высокой степенью сжатия и пастовые сгустители. Проанализированы существующие СУ процессом сгущения, выявлены их преимущества и недостатки, определен метод управления на основе прогнозирующей модели. Обоснована необходимость распределения питающего потока между параллельными сгустителями;

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

3 Проанализированы архивные производственные данные с помощью аналитического инструмента GE Proficy Troubleshooter, являющегося компонентом программной среды GE Proficy Csense. Получены статические характеристики целевого параметра «мутность верхнего слива сгустителя» от основных измеряемых параметров. Проведен корреляционный анализ измеряемых параметров исследуемого ОУ;

4 Разработана обобщенная динамическая модель, включающая в себя модель агрегации твердой фазы, модель зоны стесненного осаждения и уплотнения осадка, модель зоны осветления. Обобщенная модель 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 и учитывает зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации. Структура динами-

ческой модели сгустителя представлена простой каскадной моделью Винера-Гаммерштейна и состоит из последовательно соединенных динамических линейных элементов, представленных в работе двумя аperiodическими звеньями первого порядка, и статического нелинейного элемента, представленного стационарной нелинейной моделью;

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 решает задачу моделирования процесса осаждения флокулированной суспензии в сгустителе и включает в себя: модель процесса флокуляции, поправочный коэффициент Лепле для расчета скорости Стокса в зависимости от числа Рейнольдса частицы, коэффициент формы флокулы, переменную площадь поперечного сечения цилиндрической и цилиндроконической частей сгустителя. Учет при моделировании процесса сгущения конической части сгустителя для исследуемого объекта управления позволяет на 30 % уменьшить погрешность при расчете высоты постели;

7 Модель зоны осветления строится на основе теории осаждения Кинча, дополненной поправочными коэффициентами. Рассчитан поправочный коэффициент, позволяющий учитывать зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации. Получен в программном комплексе ANSYS Fluent поправочный коэффициент для исследуемого ОУ, позволяющий компенсировать ошибки моделирования при расчете концентрации твердой фазы в верхнем сливе сгустителя при использовании на входе модели моночастицы. В качестве вспомогательных программных инструментов для построения модели зоны осветления использовались Curve Fitting Toolbox от MatLab и программа «Excel Population Balance Model», разработанная в ходе проекта «AMIRA p266 project: Improving thickening technology», спонсором которого является компания РУСАЛ, в которой получен диапазон распределения флокул по размерам после процесса флокуляции и дефлокуляции;

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 цилиндроконической 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 (MPC) для каждого из сгустителей и блок оптимизации на основе алгоритма клонального отбора. САУ поддерживает содержание твердой фракции в сгущенном продукте на выходе с ветки сгущения в диапазоне 0.085-0.095 об.долей и минимизирует массовый расход твердого с верхним сливом в среднем на 180 кг/ч. Алгоритм параллельного поиска оптимума функции протестирован в среде MatLab. Синтез и тестирование на базе архивных производственных данных САУ реализованы в среде GE Proficy Architect.

СПИСОК СИМВОЛОВ

ρ_S	плотность твердой фракции в питающей пульпе	кг/м ³
ρ_f	плотность жидкой фазы в питающей пульпе	кг/м ³
ρ_M	значение плотности смеси	кг/м ³
μ	вязкость суспензии при рабочей температуре	Па·с
k	коэффициент сферичности флоккулы	
d_0	средневзвешенный диаметр частицы	м
d_i	средний диаметр частиц в выбранном интервале i	м
D_{floc}	диаметр флоккулы, образующейся в процессе агрегации	м
φ_D = φ_{UF}	содержание твердой фракции в сгущенном продукте	об. доли
$\varphi_F = \varphi_0$	содержание твердой фракции в питающей пульпе	об. доли
φ_c	значения гелевой точки или критической концентрации	об. доли
z_O	уровень перетока осветленного раствора	м
z_F	уровень подачи питания в сгустителе	м
$Re_{\text{ч}}$	значение числа Рейнольдса для частицы	
K_L	поправочный коэффициент Лепле на скорость Стокса	
K	коэффициент, отражающий пропорциональную зависимость выхода твердой фракции в осветленный слив от концентрации твердой фракции в точке питания z_F для образцового сгустителя	
K'	поправочный коэффициент, позволяющий учитывать зарастание и зашламливание сгустителя в процессе его эксплуатации	
ε	порозность	об. доли
$U_{S\infty}$	скорость Стокса	м/с

U_S	скорость осаждения	м/с
n	значение индекса стесненного осаждения/ индекса Ричардсона - Заки	
$f_{bk}(\varphi)$	функция плотности потока Кинча для периодического процесса	м/с
$f_k(\varphi)$	функция плотности потока Кинча для непрерывного процесса	м/с
q	конвективная скорость пульпы	м/с
$\sigma_e(\varphi)$	эффективное сжатие твердого вещества	Па
σ_0	эмпирический коэффициент, характеризующий предел текучести при сжатии осадка	Па
c	эмпирический коэффициент, характеризующий предел текучести при сжатии осадка	
D	диаметр цилиндрической части сгустителя	м
H	общая высота сгустителя	м
$H_{cylinder}$	высота цилиндрической части сгустителя	м
H_{cone}	высота конической части сгустителя	м
S	площадь поперечного сечения сгустителя	м ²
$K_c(\varphi)$	коэффициент сопротивления «твердое вещество – жидкость»	
$k_{пр}(\varphi)$	проницаемости осадка	м ²
U_r	относительная скорость «твердое вещество – жидкость»	м/с
H_{bed}	высота постели	м
I	ток, потребляемый двигателем при вращении граблин	А
H_{rake}	высота граблин	м
Q_{Σ}	суммарный объемный расход питающей пульпы на ветке сгущения	м ³ /с

Q_F	объемный расход питающей пульпы в сгуститель	$\text{м}^3/\text{с}$
Q_{UF}	объемный расход сгущенного продукта из сгустителя	$\text{м}^3/\text{с}$
Q_{INJ}	объемный расход жидкости на разбавление флокулянта	$\text{м}^3/\text{с}$
$Q_{\text{фloc}}$	объемный расход флокулянта	$\text{м}^3/\text{с}$
C_{OF}	концентрация твердой фракции в осветленном растворе сгустителя	$\text{кг}/\text{м}^3$
$Q_{\text{ТВ } OF}$	суммарный объемный расход твердой фракции в верхнем сливе сгустителей	$\text{кг}/\text{с}$
$Q_{\text{ТВ } F}$	суммарный объемный расход твердой фракции в питающей пульпе	$\text{кг}/\text{с}$
$Q_{\text{ТВ } UF}$	суммарный объемный расход твердой фракции в сгущенном продукте	$\text{кг}/\text{с}$

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И АББРЕВИАТУР

АСУ ТП	Автоматическая система управления технологическим процессом
АСУ	Автоматическая система управления
САУ	Система автоматического управления
СУ	Система управления
ОС	Обратная связь
ОУ	Объект управления
УУ	Управляющее устройство
КШ	Красный шлам
ПАА	Полиакриламид
СКО	Среднеквадратическое отклонение
МНК	Метод наименьших квадратов
ДУ	Дифференциальное уравнение

ИДУ	Интегро - дифференциальное уравнение
ИС	Иммунная система
ИИС	Искусственная иммунная система
PSD	Particle size distribution (распределение частиц по размерам)
MPC	Model Predictive Control (предиктивный регулятор)
РК	Распределительная питающая коробка
ЦН	Центробежный насос
НС	Насосная станция

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernando Concha A. Solid–Liquid Separation in the Mining Industry / Fernando Concha A.; Series editor Andre Thess, Ilmenau. Founding editor Rene Moreau, Ecole Nationale Superieure d’Hydraulique de Grenoble, Saint Martin d’Heres Cedex // Fluid Mechanics and Its Applications. – 2014. – Vol. 105. – 429 p.
2. Ardila Labiosa, Alexander. Dynamic simulation of red mud washers used in aluminum industries: Submitted in total fulfilment of the requirements of the degree of Master in Chemical Engineering. – School of civil, environmental and chemical engineering RMIT University VICTORIA, – Australia. – 2010. – 143 p.
3. Yang, J. A generalized correlation for equilibrium of forces in liquid–solid fluidized beds / J. Yang, A. Renken // Chemical Engineering Journal. – vol. 92. – 2003. – pp. 7-14.
4. Bürger, R. A kinematic model of continuous separation and classification of polydisperse suspensions / R. Bürger, A. García, K.H. Karlsen, J.D. Towers // Computers & Chemical Engrg. – Vol. 6. – No. 32. – 2007. – pp. 1173-1194.
5. Bürger, R. Settling velocities of particulate systems: Phenomenological theory of sedimentation processes: numerical simulation of the transient behaviour of flocculated suspensions in an ideal batch or continuous thickener / R. Bürger, M.C. Bustos, F. Concha // Int. J. Miner. Process. – No. 55. – 1999. – pp. 267-282.
6. Bürger, R. A mathematical model for batch and continuous thickening in vessels with varying cross section / R. Bürger, J.J.R. Damasceno, K.H. Karlsen // Int. J. Miner. Process. – No. 73. – 2004. – pp. 183-208.
7. Jnior, Alpio. Using a Multivariate Statistical in the Identification of Alumina Loss in Red Mud / Alpio Jnior, Amrico Borges, Ayana Oliveira // Brasil Light Metals. – 2013. – P. 87-89.
8. Hanahan, C. Chemistry of Seawater Neutralization of Bauxite Refinery Residues (Red Mud) / C. Hanahan, D. McConchie, J. Pohl, R. Creelman, M. Clark, C. Stocksiek // Australia: Environmental Engineering Science. – 2004. – P. 161-166.

9. United States Patent. Thickener Control Process / Karman, James S. – № 4.273.658; Published 09.25.1979.
10. Patent WO. Processes for treating red mud / R. Boudreault, J. Fournier, D. Primeau, M. Labrecque, M. Gilbert – № 2013104059; Published 18.07.2013.
11. Rai, S. Feasibility of red mud neutralization with seawater using Taguchi's methodology / S. Rai, K.L. Wasewar, D.H. Lataye, J. Mukhopadhyay, C.K. Yoo // China. Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2012. – P. 124-128.
12. Сизяков, В.М. Разработка технологических основ и технологии производства глинозёма высокого качества и новых видов попутной продукции при комплексной переработке щелочных алюмосиликатов. Автореферат диссертации доктора технических наук. ЛГИ. – Л. – 1983. – 47 с.
13. Сизяков, В.М. Повышение качества глинозема и попутной продукции при комплексной переработке нефелинов / В.М. Сизяков, В.И. Корнеев, В.В. Андреев. М.: Metallurgy. – 1986. – с. 117-118.
14. Троицкий И.А. Metallurgy алюминия / И.А. Троицкий, В.А. Железнов. М.: «Metallurgy». – 1984. – 398 с.
15. Абрамов, В.Я. Физико-химические основы комплексной переработки алюминиевого сырья / В.Я. Абрамов, И.В. Николаев, Г.Д. Стельмакова. М.: Metallurgy. – 1985. – 288 с.
16. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер. М.: Metallurgy. – 1978. – 344 с.
17. Fawell, P.D. 20 years of AMIRA P266 «Improving Thickener Technology» – how has it changed the understanding of thickener performance? / P.D. Fawell, J.B. Farrow, A.R. Heath, T.V. Nguyen, A.T. Owen, D. Paterson, M. Rudman, P.J. Scales, K. Simic, D.W. Stephens, J.D. Swift, S.P. Usher // Proceedings of the 12th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. – Chile. – 2009. – pp. 59–68.
18. Технологии сгущения Outotec [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.outotec.com/Global/Russia/Brochures/Thickening_technologies.pdf

19. Краснопольский, Е.Д. Новое поколение АСУТП на Пикалевском объединении «Глинозем» / Е.Д. Краснопольский, Р.Г. Локшин // Цветные металлы. – 2000. – №1. – С. 83-87.
20. Нечаева, Е. Преимущества использования высокопроизводительных сгустителей SUPAFLO / Е. Нечаева, С. Прокола, Э. Саастамойнен // Цветные металлы. – 2001. – Спец. выпуск. – С. 13-18.
21. Степаненко, А.И. Интенсификация процессов глиноземного производства / А.И. Степаненко, А.В. Бауман // Аллюминий Сибири. – 2008. – С. 385-388.
22. 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.
23. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.clarometer.com/index.html>
24. Затуловский, К.А. Управление технологическим процессом сгущения красного шлама на основе прогнозирующей модели осаждения с учетом влияния флокулянта: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. – Санкт-Петербург, 2013. – 114 с.
25. Файн, И.М. А.с. Способ управления группой параллельно работающих сгустителей / И.М. Файн, В.С. Куценко, В.В. Александров, Т.Г. Мильбергер, П.Ф.Минин. – Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности и Пикалевский глиноземный комбинат. – № 479480. – Оpubл. 05.08.75. – бюл. №29.
26. Муфель, А.П. Способ управления процессом сгущения пульпы / А.П. Муфель, В.Ф. Беккер, А.Ш. Зайнуллина, В.Л. Перов, И.А. Альжев, В.П. Шанин. – Производственное объединение «Урал-калий». – № 4760959/26. – Оpubл. 21.11.89. – бюл. № 17.

27. Левин, М.В. Автоматическая система управления параллельно работающими сгустителями пульпы / М.В. Левин, Т.Б. Потапова, А.С. Кузнецов, А.Ф. Жаров, Р.М. Хамидов, А.П. Бургардт, Ю.П. Рожнев, Б.К. Акимкулов. – Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности и Павлодарский алюминиевый завод. – № 4843535/26. – От 07.04.92. – бюл. № 13.

28. Кушнир, Н.В. Искусственные иммунные системы: обзор и современное состояние / Н.В. Кушнир, А.В. Кушнир, Е.В. Анацкая, П.А. Катышева, К.Г. Устинов // Научные труды КубГТУ. – № 12. – 2015. – с. 382-391.

29. Аксенов, В.В. Метаэвристические методы решения задач комбинаторной оптимизации // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ-2009): тр. Междунар. науч. конф. (30 марта–3 апреля 2009 г., Н. Новгород). – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2009. – 799 с.

30. Самигулина, Г.А. Разработка интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе искусственных иммунных систем // Теоретическая информатика. – 2009. – Вып. 4. – с. 15-22.

31. Брюховецкий, А.А. Применение моделей искусственных иммунных систем для решения задач многомерной оптимизации / А.А. Брюховецкий, А.В. Скатков // Оптимізація виробничих процесів. – № 7. – 2010. – с. 119–122.

32. Garrett, S.M. How do we evaluate artificial immune systems? How do we evaluate artificial immune systems? // 2005. – vol. 13. – pp. 145-178.

33. Hunt, J.E. Learning using an artificial immune system / J.E. Hunt, D.E. Cooke // Journ. Of Network Computing Applications. – 1996. – vol. 19. – pp. 189-212.

34. Knight, T. An immunological approach to data mining / T. Knight, J. Aine Timmis // Intern. Conf. on Data Mining. – 2001. – pp. 297-304.

35. Timmis, J. An artificial immune system for data analysis / J. Timmis, M. Neal, J. Hunt // Biosystems. – vol. 55. – 2000. – pp. 143-150.

36. Dasgupta, D. Recent advances in artificial immune systems: Models and applications / D. Dasgupta, S. Yua, F. Nino // *Applied Soft Computing*. – vol. 11. – 2011. – pp. 1574-1587.
37. Puteh, M. Flexible immune network recognition system for mining heterogeneous data / M. Puteh, A.R. Hamdan, K. Omar, A.A. Bakar // *7th Intern. Conf. ICARIS-08*, Springer. – Berlin. – 2008. – pp. 232-241.
38. Castro, P.A.D. Mobais: A Bayesian artificial immune system for multi-objective optimization / P.A.D. Castro, F.J. Zuben // *7 th Intern. Conf. ICARIS-08*. – 2008. – pp. 48-59.
39. De Castro, Leandro N. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle / Leandro N. de Castro, Fernando J. Von Zuben // *Transactions on evolutionary computation*. – vol. 6. – no. 3. – 2002. – pp. 239-251
40. Sutton, R.S. Reinforcement Learning: An Introduction / R.S. Sutton, A.G. Barto. MA: MIT Press. – England. – 2012. – 334 p.
41. Smith, D.J. Deriving shape space parameters from immunological data / D.J. Smith, S. Forrest, R.R. Hightower, S.A. Perelson. *J. Theor. Biol.* – vol. 189. – no. 2. – 1997. – pp. 141–150.
42. Hodgkin, P.D. Role of cross-reactivity in the development of antibody Responses / *Immunologist*. – vol. 6. – no. 6. – 1998. – pp. 223–226.
43. Ada, G.L. The clonal selection theory / G.L. Ada, G. Nossal. *Sci. Amer.* . – vol. 257. – no. 2. – 1987. – pp. 50–57.
44. Sprent, J. T and B memory cells / *Cell*. – vol. 76. – no. 2. – 1994. – pp. 315–322.
45. Mason, D. Antigen cross-reactivity: Essential in the function of TCRs / *Immunologist*. – vol. 6. – no. 6. – 1998. – pp. 220–222.
46. Haykin, S. *Neural Networks—A Comprehensive Foundation* / Prentice-Hall. – 2nd ed. Englewood Cliffs. – 1999. – 842 p.
47. Ahmed, R. Immunological memory / R. Ahmed, J. Sprent // *Immunologist*. – vol. 7. – no. 1–2. – 1999. – pp. 23–26.

48. Berek, C. The maturation of the immune response / C. Berek, M. Ziegner // *Immun. Today.* – vol. 14. – no. 8. – 1993. – pp. 400–402.
49. George, A.J.T. Receptor editing during affinity maturation / A.J.T. George, D. Gray // *Immun. Today.* – vol. 20. – no. 4. – 1999. – 196 p.
50. Nussenzweig, M.C. Immune receptor editing: Revise and select // *Cell.* – vol. 95. – no. 7. – 1998. – pp. 875-878.
51. Tonegawa, S. Somatic generation of antibody diversity // *Nature.* – vol. 302. – no. 14. – 1983. – pp. 575-581.
52. Карпенко, А. Гибридный метод глобальной оптимизации на основе искусственной иммунной системы / А.П. Карпенко, Д.Л. Шуров // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.* – № 8. – 2012. – 40 с.
53. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости: гидродинамика, перемешивание и теплообмен / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир. – 1964. – 216 с.
54. Юфин, А.П. Гидромеханизация / А.П. Юфин – М.: Стройиздат. – 1974. – 265 с.
55. Воробьев, А.С. Снижение энергозатрат трубопроводной системы при перекачке сгущенных гидросмесей хвостов обогащения полиметаллических руд на закладочные комплексы: Дис. канд. техн. наук: 05.05.06. – Санкт-Петербург, 2015. – 210 с.
56. Федорова, Э.Р. Качественные и количественные характеристики красного шлама. — М.: Издательство «Горная книга». — Моделирование процесса сгущения красного шлама. Отдельные статьи: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — № 11 (специальный выпуск 33) . — 2016. — с. 13-27.
57. Беседин, А.А. Повышение комплексности переработки бокситов за счет утилизации красного шлама в производстве портландцемента: Дис. канд. техн. наук: 05.16.02. – Санкт-Петербург, 2014. – 174 с.

58. Отчет по НИОКР «Обогащение красного шлама с попутным извлечением редкоземельных и рассеянных элементов»/ «Уралпромэнергопроект» . – Каменск-Уральский. – 2011. – 138 с.

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

60. Reiss, L.R. *Ind. Eng Chem. Process Des., Dev.* 6. – 1967. – 486 p.

61. Felice, R. Di. Sedimentation Velocity of Solids in Finite Size Vessels / R.Di Felice, R. Kehlenbeck // *Chem. Eng. Technol.* – vol. 23. – no. 12. – 2000. – pp. 1123-1126.

62. Krishnamoorthy, P . Sedimentation model and analysis for differential settling of two - particle - size suspensions in the Stokes region // *International Journal of Sediment Research.* – vol. 25. – 2010. – pp. 119-133.

63. Jean, R.-H. *Multiphase Flow: Liquid/Solid Fluidized Bed Systems* / R.-H. Jean, L.-S. Fan: *The handbook of fluid dynamics* edited by R.W. Johnson. – CRS Press LLC. – 1998. – pp. 19.1-19.23.

64. Alrawi, Reem A. Estimating the Richardson-Zaki Index n for Non-Spherical Irregular Natural Sediments in a Concentrated Suspension / Reem A. Alrawi, Anees Ahmad, Norli Ismail, A.K. Mohd Omar // *1st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT.* – Salahaddin University-Erbil, Kurdistan, Iraq. – 2016. – 6 p.

65. Richardson, J.F.. Sedimentation and fluidisation. Part 1 / J.F. Richardson, W.N. Zaki. – *Trans. Inst. Chem. Eng.* – vol. 32. – 1954. – pp. 35-53.

66. Kelessidis, V.C. Terminal Velocity of Solid Spheres Falling in Newtonian and non Newtonian Liquids. – *Tech. Chron. Sci. J. TCG.* – vol. V. – no. 1-2. – 2003. – pp. 43-54.

67. Chong, Y.S. Effect of particle shape on hindered settling in creeping flow / Y.S. Chong, D.A. Ratkowsky, N. Epstein. – Powder Technology. – vol. 23. – no. 1. – 1979. – pp. 55-66.
68. Baldock, T.E. Settling velocity of sediments at high concentrations / T.E. Baldock, M.R. Tomkins, P. Nielsen, M.G. Hughes. – Coastal Engineering. – vol. 51. – 2004. – pp. 91-100.
69. Tomkins, M.R. Hindered settling of sand grains / M.R. Tomkins, T.E. Baldock, P. Nielsen. – Sedimentology. – vol. 52. – 2005. – pp. 1425-1432.
70. Cuthbertson, A. Hindered settling velocity of cohesive/non-cohesive sediment mixtures / A. Cuthbertson, P. Dong, S. King, P. Davies. – Coastal Engineering. – vol. 55. – 2008. – pp. 1197-1208.
71. Датчики для систем автоматизации [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://isup.ru/articles/16/1195/>
72. АСУ сгустителя/осветлителя [электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.twellgroup.ru/asu_sgust.html
73. «ТЕХНОЛИНК». Proficy Troubleshooter, 2013 [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.technolink.spb.ru/production/158/373/>
74. 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.
75. 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.
76. 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.

77. Nopens, Ingmar. The sedifloc project / Ingmar Nopens, Ruxandra Govoreanu, Bob De Clercq, Klaas Malisse Dirk De Pauw, Jeriffa De Clercq, Peter A. Vanrolleghem. – RAASF Workshop. – Belgium. – BIOMATH Department of Applied Mathematics, Biometrics and Process Control. – 2004. – 46 p.

78. Heath, Alex R. Combined population balance and CFD modeling of particle aggregation by polymeric flocculant / Alex R. Heath, Peter T.L. Koh, A.J. Parker // Cooperative Research Centre for Hydrometallurgy (CSIRO Minerals) . – Clayton South, Victoria, Australia. – Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO. – Australia. – 2003. – 6 p.

79. CSIRO. Excel population balance model, user's notes. 2008.

80. Runkanaa, Venkataramana. A Population Balance Model for Flocculation of Colloidal Suspensions Incorporating the Influence of Surface Forces / Venkataramana Runkanaa, P. Somasundarana, P.C. Kapurb // [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.columbia.edu/cu/iucrc/IAB/May2007/NSF%20IUCRC%20Papers/A%20Population%20balance%20model%20flocculation%20of%20colloidal%20suspensions%20incorporating%20the%20influence%20of%20surface%20force.pdf>

81. CSIRO. P266F 1-D Sedimentation Model Manual. – 2008.

82. Арушанян, О.Б. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений / О.Б. Арушанян, С.В. Залеткин // М.: Изд-во МГУ. – 1990. – 336 с.

83. Хайрер, Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи / Э. Хайрер, Г. Ваннер // Пер. с англ. М.: Мир. – 1999. – 586 с.

84. Дьяконов, В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: самоучитель. – М.: ДМК Пресс. – 2008. – 592 с.

85. Дьяконов, В.П. MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6 в математике и моделировании. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2005. – 800 с.
86. Hunt, B.R. A Guide to Matlab: For Beginners and Experienced Users / B.R. Hunt, R.L. Lipsman, J.M. Rosenberg, K.R. Coombes, J.E. Osborn, G.J. Stuck. Cambridge University Press. — 2001. — 346 p.
87. Kalechman, M. Practical MATLAB Basics for Engineers. Taylor & Francis. — 2008. — 698 p.
88. Kalechman, M. Practical MATLAB Applications for Engineers. CRC Press. — 2008. — 704 p.
89. Курц, В.В. Моделирование сцепления автомобиля в транспортных тренажёрах [электронный ресурс] / В.В. Курц, И.Е. Ануфриев // Санкт-Петербургский государственный Политехнический университет. – Режим доступа: <http://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%20381-396%20Kurts.pdf>
90. 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.
91. Перри, Дж. Г. Справочник инженера-химика. – Т.1. - М.: ОНТИ, ГРХЛ, 1937. – 1020 с.
92. Шервуд, Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки. Пер. с англ – М.: Химия, 1982. – 696 с.
93. Воронцов, К.В. Лекции по алгоритмам восстановления регрессии // <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/a/aa/Voron-ML-Regression.pdf>
94. Cleveland, W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots // Journal of the American Statistical Association. – 1979. – Vol. 74, no. 368. – Pp. 829– 836.
95. Оценка достоверности выборочного уравнения регрессии и его параметров. Показатели качества модели регрессии [электронный ресурс]. – Ре-

жим доступа: http://studopedia.ru/9_156161_otsenka-dostovernosti-viborochnogo-uravneniya-regressii-i-ego-parametrov-pokazateli-kachestva-modeli-regressii.html

96. ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT 17.0. Theory Guide. – 2015.
97. ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT 17.0. User's Guide. – 2015.
98. Клинов, А.В. Численное моделирование зон осаждения полидисперсной взвеси в малых водотоках [электронный ресурс] / А.В. Клинов, А.Г. Мухаметзянова, К.А. Алексеев. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=18216095>
99. Федорова, Э.Р. CFD моделирование сгустителя красных шламов. – Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. – 2016. – № 12 (54) . – Часть 3. – с. 194-200.
100. Губин, В.В. Разработка системы автоматического управления технологическим процессом выплавки никелевых анодов в электродуговой печи: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. – Санкт-Петербург, 2016. – 151 с.
101. Гольдштейн, А.Л. Оптимизация в среде MatLab: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 192 с.
102. Аоки, М. Введение в методы оптимизации: пер. с англ. – М.: Наука. – 1977. – 334 с.
103. Аттетков, А.В. Методы оптимизации: учебник для вузов / А.В. Аттетков, С.В. Галкин, В.С. Зарубин. Под ред. В.С. Зарубина. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2003. – 440 с.
104. Гольдштейн, А.Л. Исследование операций: многокритериальные задачи: конспект лекций. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. – 1995. – 72 с.
105. Жиглявский, А.А. Методы поиска глобального экстремума / А.А. Жиглявский, А.Г. Жилинскас. – М.: Наука. – 1991. – 248 с.
106. Соболев, Б.В. Методы оптимизации: Практикум / Б.В. Соболев, Б.Ч. Месхи, Г.И. Каньгин. – Ростов-н/Д: Феникс. – 2009. – 377 с.
107. Федунец, Н.И. Методы оптимизации: учеб. пособие для вузов / Н.И. Федунец, Ю.Г. Черников. – М.: Изд-во МГГУ. – 2009. – 544 с.

108. Мирошник, И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – учебное пособие. – СПб: Питер. – 2006. – 272 с.
109. Попов, Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – учебное пособие. – 2-е-е изд. – М.: Наука. – 1988. – 256 с.
110. Vemporad, A. Model predictive control/ A. Vemporad, M. Morari, N.L. Ricker. – MathWorks. – 2010. – 205 p.
111. Брюханов, В.Н. Теория автоматического управления / В.Н. Брюханов, М.Г. Косов, С.П. Протопопов, Ю.М. Соломенцев. – 3-е-е изд. – М.: Высшая школа. – 2000. – 270 с.
112. Филлипс, Ч. Системы управления с обратной связью/ Ч. Филлипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория Базовых Знаний. – 2001. – 616 с.
113. Заболотнов, Ю.М. Оптимальное управление непрерывными динамическими системами. – Самара: СГАУ. – 2005. – 129 с.
114. 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.
115. Сафонов, Д.Н. Управление процессом разделения технологических пульп медно-никелевого производства в современных фильтр-прессах: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. – Санкт-Петербург, 2012. – 108 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017611596

ПРОГРАММНЫЙ ТРЕНАЖЕР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ

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

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэльевна (RU), Фирсов Александр
Юрьевич (RU), Затуловский Кирилл Аркадьевич (RU)*

Заявка № 2016663831

Дата поступления 16 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 февраля 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Назин Г.П. Назин