

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

На правах рукописи

Пупышева Елена Александровна



СИСТЕМА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ПРОТИВОТОЧНОЙ ПРОМЫВКИ
КРАСНОГО ШЛАМА ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Федорова Э.Р.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТИВОТОЧНОЙ ПРОМЫВКИ КРАСНОГО ШЛАМА.....	9
1.1. Процесс получения глинозема по цепочке Байера	9
1.2 Красный шлам	14
1.3 Теория противоточной промывки красного шлама	14
1.4 Общая теория процессов разделения твердой и жидкой фазы.....	17
1.4.1 Гравитационное осаждение.....	17
1.4.2 Процесс укрупнения твердой мелкодисперсной фазы	18
1.5 Промыватель – однокамерный радиальный сгуститель.....	21
1.6 Питающий стакан.....	23
1.7 Анализ существующих систем управления технологическим процессом противоточной промывки.....	27
1.8 Системы усовершенствованного управления технологическим процессом противоточной промывки КШ.....	32
1.8.1 Применение прогнозной модели в СУУ ТП противоточной промывки КШ.....	38
1.8.2 Применение мягкого датчика в СУУ ТП противоточной промывки КШ	39
Выводы к главе 1	42
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АГРЕГАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПУЛЬПЫ В ПРИСУТСТВИИ ФЛОКУЛЯНТА	44
2.1 Питающий стакан.....	44
2.2 Способы подачи флокулянта	45
2.3 Математические модели и уравнения укрупнения частиц	46
2.4 Математическое описание модели популяционного баланса.....	51
2.4 Определение гранулометрического состава исследуемой пробы красного шлама.....	58
2.5 Влияние скорости сдвига на модель агрегации и деагрегации частиц.....	62
2.6 Программная реализация процесса агрегации пульп в присутствии флокулянта.....	64
2.7 Верификация результатов работы модели роста и распада частиц	69
Выводы к главе 2	75
ГЛАВА 3 ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОМЫВАТЕЛЯ.....	77
3.1 Однокамерный промыватель	77
3.2. Математическое описание свободного осаждения	79
3.3 Математическое описание стесненного осаждения.....	81
3.3. Лабораторный эксперимент для получения параметров модели	83

3.4 Получение эмпирических параметров для расчета модели промывателя.....	84
3.4.1 Применение технологии машинного зрения для определения параметров осаждения.....	84
3.5 Верификация результатов работы обобщенной модели промывателя.....	88
3.6 Разработка веб-интерфейса обобщенной модели промывателя.....	92
Выводы к главе 3	94
ГЛАВА 4 СИСТЕМА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОТИВОТОЧНОЙ ПРОМЫВКИ.....	96
4.1 Разработка подмодели расчета содержания NaOH.....	97
4.1.1. Обзор существующих методов расчета	97
4.1.2. Математическая подмодель расчета содержания NaOH.....	99
4.2 Интеграция модулей прогнозной модели промывки в СУУ ТП противоточной промывки	103
4.3 Верификация СУУ ТП противоточной промывки красного шлама глиноземного производства	107
4.3.1 Подготовка архивных данных процесса противоточной промывки	107
4.3.2 Оценка работы прогнозной модели в системе управления.....	109
4.4 Теоретический технико-экономический эффект внедрения прогнозной модели	117
Выводы к главе 4	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	122
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов диссертации.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Производство глинозема по способу Байера сопровождается образованием значительных объемов красного шлама (КШ), который представляет собой нерастворимый вторичный продукт переработки бокситов гидроксидом натрия. Последним этапом перед транспортировкой КШ на шламохранилище является процесс противоточной промывки, который обеспечивает рециркуляцию ценных компонентов Al_2O_3 и Na_2O , снижая при этом негативное влияние гидроксида натрия на окружающую среду.

Промыватели, используемые в процессе противоточной промывки, представляют собой сложные объекты управления (ОУ), характеризующиеся высокой инерционностью, корреляцией входных и выходных параметров, что делает процесс промывки сложно управляемым при постоянно действующих возмущениях питающего потока шламовой пульпы. Система управления (СУ) противоточной промывкой КШ на исследуемом предприятии и аналогичных ему является полуавтоматической с непосредственным участием операторов, технологов и корректировкой уставочных значений и управляющих воздействий.

Промыватели имеют ряд конструкционных ограничений, которые не позволяют измерить средневзвешенный диаметр нестабильной укрупненной флоккулы КШ на выходе из-под питающего стакана с помощью датчиков или осуществить отбор пробы пробоотборником. Косвенно измерить средневзвешенный диаметр флокул, формирующихся при взаимодействии КШ с флокулянтom в питающем стакане промывателя, можно программно-управляемым датчиком (soft sensor).

Актуальной задачей для металлургических предприятий является модернизация классической структуры АСУ ТП с переходом на технологию многопараметрического управления – система усовершенствованного управления технологическим процессом (СУУ ТП), что в иностранной литературе носит название APC (Advanced process control). Одними из основных модулей СУУ ТП являются: адекватная прогнозная модель процесса и программно-управляемый датчик (soft sensor). СУУ ТП позволит снизить общее время регулирования при управлении процессом противоточной промывки, уменьшить объемную долю жидкой фазы и содержание гидроксида натрия в отвальном КШ.

В связи с многосвязностью параметров процесса и его нелинейностью разработка модулей СУУ ТП является сложной научной задачей, требующей современных подходов к разработке.

Степень проработанности темы. Значительный вклад в развитие отечественной технологии производства глинозема внесли советские и российские инженеры и ученые: А.Н. Кузнецов, Е.И. Жуковский, В.А. Мазель, А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, В.М. Сизяков, В.Н. Бричкин, А.А. Аграновский, И.В. Логинова и др. Общий вклад в исследование разделения

твердой и жидкой фаз внесли зарубежные ученые *G.J. Kynch, H.S. Coe, G.H. Clevenger, L.K. Hudson, R. Burger, F. Concha* и др. Процесс агрегации частиц подробно описан в фундаментальных работах: *M.V. Smoluchowski, P.T. Spicer, M.J. Hounslow, G.R. Quezada, I. Nopens, C.A. Biggs*.

Вопросы совершенствования СУ, моделирования процесса разделения твердой и жидкой фаз, моделирования гидрометаллургического оборудования решались в рамках исследований отечественных и зарубежных научных организаций ООО РУСАЛ ИТЦ, РУСАЛ УАЗ (Россия), CSIRO Minerals, Amira Global, SysCAD (Австралия) и др. Результаты исследований были опубликованы следующими авторами: В.О. Голубев, Д.Г. Чистяков, Е.В. Пустынных, А.А. Молочков, С.А. Лобанов, М.В. Филинков, *P.D. Fawell, J. Farrow, P. Scales, S. Usher, K.H. Karlsen* и др.

Исследование процесса противоточной промывки шламов отражены в работах российских и зарубежных ученых: В.И. Саламатов, О.В. Саламатов, *A.A. Labiosa, K. Kafumbila* и др.

Цель диссертационной работы – уменьшить объемную долю жидкой фазы в пульпе из-под конуса каждого промывателя и поддерживать содержание щелочи на последнем этапе процесса противоточной промывки красного шлама глиноземных производств не более значения, указанного в регламенте.

Идея – для достижения поставленной цели необходимо разработать программные модули СУУ ТП противоточной промывки КШ глиноземного производства с непостоянным потоком на входе: программно-управляемый датчик (soft sensor) для косвенного измерения средневзвешенного диаметра флокул и прогнозную модель противоточной промывки КШ.

Объект исследования – система усовершенствованного управления технологическим процессом противоточной промывки красного шлама глиноземных производств.

Предмет исследования – программно-управляемый датчик (soft sensor) для косвенного измерения средневзвешенного диаметра флокул на выходе из питающего стакана и прогнозная модель противоточной промывки красного шлама глиноземных производств.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести анализ существующих СУ процессом противоточной промывки КШ на предмет необходимости модернизации классической структуры АСУ ТП, литературный и патентный обзор научно-технических решений;
- теоретически обосновать, разработать и экспериментально верифицировать математическую модель агрегации и деагрегации КШ в присутствии флокулянта, являющейся основой программно-управляемого датчика (soft sensor), как составной части СУУ ТП;

- описать достоинства и недостатки существующих моделей однокамерных радиальных промывателей и обосновать необходимость разработки адекватной обобщенной математической модели процесса промывки;

- разработать и экспериментально верифицировать прогнозную математическую модель противоточной промывки КШ, как составной части СУУ ТП.

Научная новизна работы

- установлена зависимость средневзвешенного диаметра сфлуктурированных частиц из-под питающего стакана промывателя от исходного гранулометрического состава пульпы красного шлама;

- разработана математическая модель агрегации и деагрегации красного шлама в присутствии флокулянта на базе модели популяционного баланса, позволяющая рассчитывать средневзвешенный диаметр сфлуктурированных частиц из-под питающего стакана промывателя и распределение флокулов по размерам в питающем стакане в зависимости от исходного гранулометрического состава пульпы;

- предложена структура системы усовершенствованного управления технологическим процессом противоточной промывки красного шлама глиноземного производства с непостоянным потоком на входе на базе прогнозной модели процесса противоточной промывки и программно-управляемого датчика (soft sensor) для определения неизмеряемого параметра.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- предложено использовать модель агрегации и деагрегации красного шлама в присутствии флокулянта на базе модели популяционного баланса в составе программно-управляемого датчика (soft sensor) косвенного измерения параметров средневзвешенного диаметра флокулов из-под питающего стакана и распределения флокулов по размеру в процессе флокуляции в питающем стакане в динамике и по завершении процесса с учетом возможной деагрегации частиц (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022619089, №2022683727) (Приложение А);

- разработана прогнозная модель противоточной промывки красного шлама в качестве модуля системы усовершенствованного управления технологическим процессом, на основе обобщенной математической модели промывателя, обеспечивающей расчет высоты уплотненного продукта в промывателе, расчет концентрации твердого вещества по высоте промывателя с отметки ниже питающего стакана, расчет концентрации твердого вещества на выходе из промывателя (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2024614660) (Приложение А) и подмодели расчета содержания щелочи из-под каждого промывателя;

– результаты исследований использованы в деятельности компании АО «Моделирование и Цифровые двойники» при моделировании процессов агрегации и деагрегации частиц, а также оптимизации технологических параметров процессов сгущения и промывки (акт о внедрении от 12.03.2025) (Приложение Б).

Методология и методы исследований

В работе использовался комплексный подход, включающий теоретические методы анализа и синтеза, моделирование процесса. Экспериментальные исследования для получения эмпирических параметров для моделирования и при верификации итоговой работы проводились на лабораторной базе научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов» (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) и исследуемого предприятия. Разработка подмоделей обобщенной математической модели процесса промывки КШ проводилась на базе Образовательного Центра Цифровых Технологий (Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II) с использованием программных продуктов Ansys, GE Proficy CSense, языка программирования Python.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель агрегации и деагрегации частиц красного шлама в присутствии флокулянта в составе программно-управляемого датчика (soft sensor) косвенно определяет неизмеряемый параметр «средневзвешенный диаметр флокул» из-под питающего стакана промывателя с погрешностью не более 13 % в зависимости от исходного гранулометрического состава пульпы.

2. Внедрение прогнозной модели противоточной промывки красного шлама и программно-управляемого датчика (soft sensor) в качестве модулей системы усовершенствованного управления технологическим процессом в условиях непостоянного потока пульпы на входе позволяет уменьшить объемную долю жидкости в пульпе красного шлама из-под промывателей противоточной промывки более чем на 3 % за счет корректировки расхода флокулянта, и поддерживать содержание щелочи на последнем этапе промывки не более 3,5 г/л за счет корректировки расхода промывной воды.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют пунктам 4, 8 паспорта специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций основывается на корректном использовании общепризнанных теорий, методов и подходов, имитационном и численном моделировании, сходимости результатов моделирования с экспериментальными и архивными производственными данными исследуемого предприятия.

Апробация результатов. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях: XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 года, Санкт-Петербург), XXII Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (май 2022 года, Донецк), 5-ый Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» (октябрь 2022 года, Москва), XI форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (декабрь 2022 года, Минск), XXXI Международный научный симпозиум «Неделя горняка 2023» (февраль 2023 года, Москва), Научная конференция студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (апрель 2023 года, Санкт-Петербург), XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2023 года, Санкт-Петербург), XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (декабрь 2024 года, Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в формулировке цели и задач диссертационной работы; анализе объекта и предмета исследования, разработке методологических подходов для проведения экспериментальных исследований; разработке программного кода для математических моделей; обработке результатов исследования; подготовке публикаций.

Публикации по работе. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах (пункты списка литературы № 9, 10, 13, 14, 42, 44-46), в том числе в 2 статьях в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук и в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 свидетельства на программы для ЭВМ (Приложение А).

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка, содержит 135 страниц машинописного текста, 57 рисунков, 16 таблиц, список литературы из 105 наименований и 2 приложения на 4 страницах.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТИВОТОЧНОЙ ПРОМЫВКИ КРАСНОГО ШЛАМА

1.1. Процесс получения глинозема по цепочке Байера

Извлечение оксида алюминия (глинозёма) из бокситов по процессу Байера, основанному на обработке сырья концентрированным водным раствором гидроксида натрия (NaOH) при повышенных температурах (в диапазоне 106–240 °С) и давлениях (1–6 атм), получило широкое распространение в мировой практике. Это обусловлено, в первую очередь, его высокой технологической и экономической эффективностью, а также универсальностью в применении к различным типам бокситового сырья [4].

Данный метод был разработан и запатентован в 1887 году австрийским химиком Карлом Байером. Первая промышленная реализация технологии нашла воплощение в конце 1880-х годов с открытием соответствующего завода. В настоящее время процесс Байера является основным способом производства глинозёма: по данной технологии функционирует около 100 действующих глиноземных предприятий, совокупная производственная мощность которых составляет порядка 134 миллионов тонн металлургического глинозёма в год. Одновременно с этим образуется приблизительно 150 миллионов тонн/год остаточных продуктов переработки, что свидетельствует о масштабности и ресурсоёмкости производства.

Советская, а в дальнейшем и российская глинозёмная промышленность, прошла эволюционный путь от экспериментальных и маломощных установок начала 1930-х годов до крупных промышленных комплексов 1970-х годов. Существенный вклад в становление отечественной алюминиевой отрасли внёс Волховский глинозёмный завод, введённый в эксплуатацию в 1931 году. Его технологическая схема изначально базировалась на методе спекания. Однако практика показала, что при «сухом» смешивании компонентов химические реакции во время термообработки протекают не полностью. Это вызвало необходимость перехода к использованию «мокрой» шихты, которая обеспечивала более равномерное распределение компонентов и, как следствие, повышение полноты реакций.

Развитие и совершенствование данной технологии нашло продолжение на Тихвинском глинозёмном заводе, открытом в 1938 году. Здесь была внедрена улучшенная схема мокрого спекания, разработанная под руководством В. А. Мазеля [7]. Нововведение позволило значительно повысить эффективность переработки бокситового сырья, особенно в отношении диаспор-бемитовых разновидностей. Вопросами оптимизации условий выщелачивания, интенсификации извлечения оксида алюминия и адаптации технологических режимов к различным типам руд активно занимались такие выдающиеся специалисты, как Д. П. Маноилов, Ф. Н. Строков, Ф. Ф. Вольф, И. С. Лилеев, С. И. Кузнецов и другие исследователи [1].

Технологически сходные подходы были реализованы и на Пикалёвском глинозёмном заводе, введённом в эксплуатацию в 1959 году. Основное сырьё здесь составляли нефелиновые концентраты, а процесс мокрого спекания позволял не только эффективно извлекать оксид алюминия, но и получать сопутствующие продукты – карбонат натрия (соду) и цемент. Таким образом, удалось создать безотходную или малоотходную модель переработки алюмосодержащего сырья.

Показательным примером масштабной промышленной реализации метода Байера стал Богословский алюминиевый завод (позднее – Богословский глинозёмно-алюминиевый комбинат), расположенный в городе Краснотурьинске Свердловской области. Введённый в эксплуатацию в 1945 году, он ориентировался преимущественно на переработку уральских бокситов. Основной технологический процесс базировался на методе Байера, однако в целях повышения эффективности переработки руд сложного минерального состава в технологическую схему внедрялись элементы спекания. Проектирование и адаптация технологических решений выполнялись при участии специалистов института «Гипроцветмет» и Всероссийского алюминиево-магниевого института (ВАМИ), что обеспечивало научную и инженерную обоснованность принятых решений.

Крупнейшим предприятием по переработке нефелиновых руд на территории СССР стал Ачинский глинозёмный комбинат, пущенный в эксплуатацию в 1970 году в Красноярском крае. Его технологическая схема базировалась на доработанном варианте спекания, разработанном научными коллективами ВАМИ и «Гипроцветмета». Адаптация методики учитывала физико-химические особенности нефелинового сырья, что позволило достичь высокой степени извлечения алюминия при одновременном получении дополнительных продуктов.

Уральский алюминиевый завод, построенный в 1939–1940 годах в городе Каменск-Уральский, также использовал преимущественно метод Байера при переработке бокситов местных месторождений. В отдельных случаях применялись элементы спекания, особенно при работе с тугоплавкими диаспор-бемитовыми рудами. Комбинированные схемы позволяли адаптировать процесс к конкретным условиям и сырьевым характеристикам, обеспечивая гибкость производства.

Развитие отечественной глинозёмной промышленности демонстрирует широкий спектр инженерных решений, направленных на адаптацию и совершенствование метода Байера в зависимости от минерально-химического состава перерабатываемого сырья. Эти технологические решения были обусловлены не только историко-экономическими реалиями, но и фундаментальными свойствами алюминия как химического элемента, определяющими особенности его добычи и переработки [5].

Алюминий – третий по распространенности элемент после кислорода и кремния в земной коре, но в природе он не встречается в виде металла. Более 95 % бокситов в мире перерабатывается с помощью концентрированного гидроксида натрия ($NaOH$) для растворения минералов алюминиевой руды. Материалы, нерастворимые в гидроксида натрия, отфильтровываются из щелочного алюминатного раствора и удаляются из контура гидрометаллургической переработки. Этот отработанный продукт известен как бокситовый остаток. На глиноземных заводах образуются значительные объемы чрезвычайно щелочных (рН 10 – 13) натриевых бокситовых остатков – красного шлама (КШ). В России на производство 1 т алюминия образуется 2 – 3 т КШ (рисунок 1.1). В среднем в мире шламохранилища занимают территорию 50 – 100 га и являются источником щелочных шламовых вод.



Рисунок 1.1 – Соотношение массы боксита и алюминия. Материалы автора

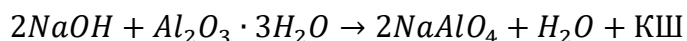
рН КШ находится в диапазоне 10,5 – 12,5 из-за присутствия гидроксида натрия и изменения минерального состава боксита во время процесса Байера.

Гибсит: $Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_2 + 4H_2O$, 105 – 150 °C

Бемит: $Al_2O_3 \cdot H_2O + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_2 + 2H_2O$, 240 °C

Диаспор: $Al_2O_3 \cdot H_2O + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_2 + 2H_2O$, 280 °C

В ходе процесса Байера боксит превращается в алюминат натрия в соответствии со следующей реакцией:



Затем гидроксид алюминия осаждается из содового раствора, промывается и сушится, а содовый раствор рециркулирует. После прокаливании конечный продукт, оксид алюминия (Al_2O_3), представляет собой мелкозернистый белый порошок.

Кроме оксида железа, другими основными компонентами красного шлама являются кремнезем, глинозем и оксид титана [9]. Основными компонентами красного шлама (% масс.) являются: Fe_2O_3 (30 – 60%), Al_2O_3 (10 – 20%), SiO_2 (3 – 50%), Na_2O (2 – 10%), CaO (2 – 8%) и TiO_2 (следы – 10%).

Цикл Байера – это цикл нагрева и охлаждения большого рециркуляционного потока раствора каустической соды (рисунок 1.2). При высокой температуре добавляется боксит, при

промежуточной температуре отделяется КШ). Затем при низкой температуре происходит осаждение глинозема.

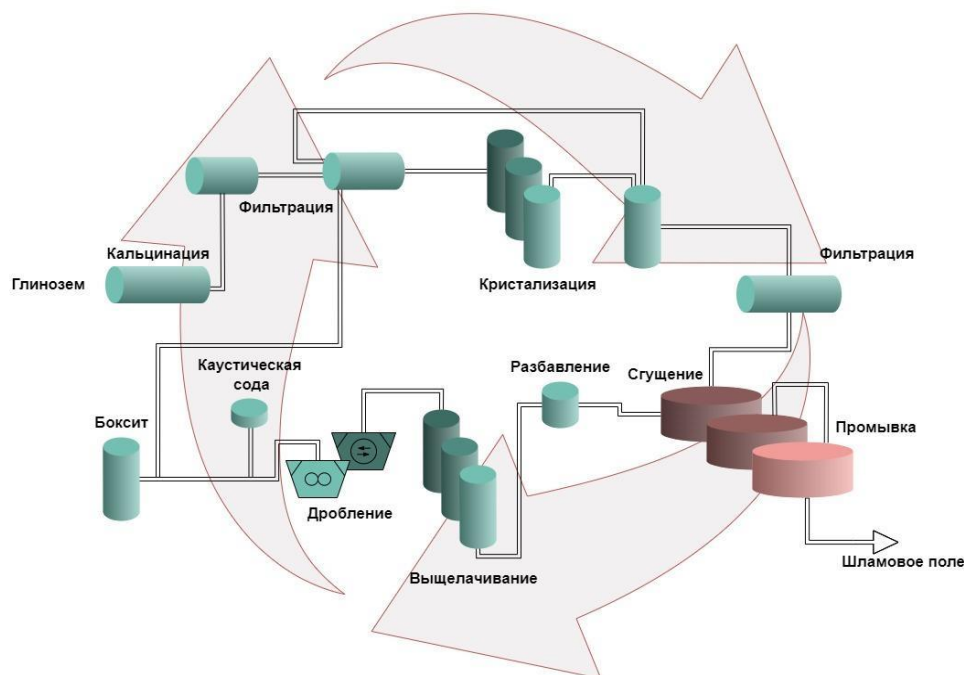


Рисунок 1.2 – Схема цикла Байера. Материалы автора

Выщелачивание

Процесс выщелачивания является начальной и одной из ключевых стадий технологии Байера, направленной на извлечение алюминиевых соединений из бокситовой руды. На этом этапе дроблённый боксит смешивается с концентрированным раствором гидроксида натрия (NaOH) и подвергается обработке при высоких температурах (до $240\text{ }^{\circ}\text{C}$) и давлениях (до 7 бар). Подобные условия способствуют химическому взаимодействию гидроксида натрия с алюминиевыми минералами, такими как гиббсит и бемит. Результатом реакции становится образование растворимого натрия алюмината ($\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$), в то время как нерастворимые компоненты руды, такие как оксиды железа и кварц, образуют остаток в виде шлама.

Для бемитовых руд, обладающих меньшей реакционной способностью, необходимы более жёсткие температурные и временные параметры процесса. Эффективность выщелачивания напрямую зависит от степени измельчения руды, её химического состава и концентрации раствора NaOH . Увеличение удельной поверхности измельчённого материала позволяет ускорить растворение алюминиевых соединений.

Осветление

После стадии выщелачивания полученная суспензия, включающая раствор натрия алюмината и твёрдый остаток (КШ), подвергается процессу осветления. Основной целью этой стадии является отделение жидкой фазы от шлама. Этот процесс осуществляется в радиальных сгустителях с использованием флокулянтов, которые способствуют агрегации мелких

твёрдых частиц, увеличивая их скорость осаждения. Осветлённый раствор, содержащий натрий алюминат, выводится в виде прозрачного слива и подготавливается к дальнейшим стадиям переработки, а шлам направляется на этап промывки [44].

Осаждение гидроксида алюминия

На стадии осаждения алюминатный раствор подвергается охлаждению до 60–70 °С, что приводит к разложению натрия алюмината с образованием гидроксида алюминия ($Al(OH)_3$). Процесс инициируется добавлением семенных кристаллов гидроксида алюминия, которые служат центрами для роста новых кристаллов. Полученные кристаллы фильтруются и отправляются на последующую термическую обработку.

Промывка красного шлама

КШ, остающийся после осаждения, содержит остаточный щелочной раствор, который необходимо извлечь для повышения экономической эффективности и предотвращения экологических рисков. Промывка шлама осуществляется в противоточных промывателях, где шлам последовательно контактирует с промывной водой. Этот процесс позволяет максимально снизить содержание щёлочи в шламе и обеспечить возвращение растворов на стадии выщелачивания.

Кальцинация

Гидроксид алюминия, осаждённый на предыдущей стадии, подвергается термическому разложению при температуре 950–1200 °С в печах кипящего слоя или вращающихся печах. Образующийся глинозем является конечным продуктом процесса Байера и после охлаждения отправляется на этап упаковки или дальнейшего использования в производстве алюминия.

Регенерация растворов

Щелочной раствор, отделённый на стадии осветления, проходит процесс регенерации. Это включает фильтрацию, очистку и возврат раствора на стадию выщелачивания. Регенерация позволяет сократить расходы на реагенты и снизить объём промывных вод, поступающих на переработку.

Переработка и утилизация красного шлама

Образующийся КШ утилизируется на шламохранилищах, где проводится его уплотнение и обработка для минимизации экологического воздействия. Часть шлама может быть переработана для извлечения ценных компонентов, таких как железо и титан. Однако значительные объёмы требуют длительного хранения и специальных мер по защите окружающей среды.

1.2 Красный шлам

Красный шлам (КШ) – это твердый остаток от переработки бокситовых руд с каустической содой для производства глинозема (Al_2O_3). Независимо от процесса производства, химический состав красного шлама содержит шесть основных компонентов. Химический анализ показывает, что КШ содержит силиций, алюминий, железо, кальций, титан, натрий, а также множество мелких элементов, таких как K , Cr , V , Ba , Cu , Mn , Pb , Zn , P , F , S , As и др.

В целом, основными минералогическими фазами красного шлама, полученного в процессе Байера, являются гиббсит ($Al(OH)_3$), боземит ($\gamma - AlOOH$), гематит (Fe_2O_3), гетит ($FeO(OH)$), кварц (SiO_2), анатаз (TiO_2), рутил (TiO_2) и кальцит ($CaCO_3$), а основными минералогическими компонентами красного шлама, полученного в процессе спекания, являются $\beta - 2CaO \cdot SiO_2$, кальцит ($CaCO_3$), арагонит ($CaCO_3$), гематит (Fe_2O_3), гиббсит ($Al(OH)_3$) и перовскит ($CaTiO_3$).

КШ представляет собой серьёзную экологическую проблему из-за высокой щёлочности и содержания токсичных компонентов. Современные технологии переработки шлама направлены на снижение его объёма, извлечение полезных компонентов и безопасное хранение. Учитывая высокую щелочность и содержание радиоактивных и потенциально вредных элементов, КШ вызывает серьезные экологические проблемы, такие как загрязнение поверхностных и подземных вод. КШ также вызывает загрязнение воздуха, поскольку его мелкодисперсные частицы легко разносятся ветром. Крупные хранилища КШ требуют средств на строительство и управление дамбами бокситовых остатков, а также приводят к существенным экологическим проблемам, таким как утечка шлама бокситовых остатков, вызванная повреждением трубопроводов, разрушением подпорных дамб, выщелачиванием щелочного раствора из удерживающего барьера.

Один из подходов – использование методов флокуляции и сгущения для выделения твёрдой фазы и возвращения щелочных растворов в процесс. Например, применение современных полиакриламидных флокулянтов позволяет ускорить осаждение частиц, увеличивая производительность промывателей. Одновременно с этим проводится работа по разработке безопасных систем хранения шлама, включающих его предварительную нейтрализацию с использованием кислых отходов или карбонатов.

Современные исследования также демонстрируют возможность извлечения редкоземельных металлов из КШ, что не только снижает его токсичность, но и позволяет использовать отходы в качестве источника дополнительных ресурсов.

1.3 Теория противоточной промывки красного шлама

Сегодня на металлургических предприятиях основной технологией промывки и извлечения каустика является противоточная промывка, при которой КШ проходит через ряд

однокамерных промывателей в направлении, противоположном потоку промывной воды. Процесс противоточной промывки основан на физических и физико-химических взаимодействиях между частицами, взвешенными в жидкой среде. Наиболее значимые из них – коагуляция, флокуляция и седиментация. Эти процессы обеспечивают эффективное разделение фаз и влияют на параметры конечного продукта, такие как прозрачность жидкости и плотность осадка. Взаимодействие частиц в процессе промывки определяет не только эффективность извлечения полезных компонентов, но и качество регенерации жидкой фазы.

КШ промывается водой в противоточной промывочной установке, что позволяет извлечь каустическую соду и остатки глинозема, которые могли остаться в шламе, перед перекачкой его в хранилище. Процесс промывки включает несколько промывочных установок (от четырех до семи), работающих последовательно. На каждом этапе на входе находится нижний поток предыдущего промывателя и верхний поток следующего. На выходе процесса получается концентрированный продукт из первой промывки (перелив) и высокая концентрация твердых частиц из последнего промывателя.

Принцип противоточной декантации заключается в том, что при воздействии воды или раствора на твердые частицы они проходят в контакте в противоположных направлениях, так что на каждом конце наиболее концентрированная часть одной из них воздействует на наиболее слабую или истощенную часть другой. Твердые частицы и жидкость разделяются путем отстаивания, при этом осевшие твердые частицы выходят через нижний слив сгустителя, а жидкость – через верхний слив. В одном конце цепи однокамерных сгустителей на выходе из нижнего потока образуется суспензия высокой плотности (обычно $> 40\%$ твердых частиц) с остатками твердых частиц, связанных с разбавленным (с низкой концентрацией щелочи) раствором, в то время как на другом конце из перелива выводится раствор с высоким содержанием щелочи, но почти без твердых частиц (< 1 г/л). На рисунке 1.3 показана типичная схема противоточной промывки. Затем отработанный технологический раствор рециркулирует через теплообменники для начала следующего производственного цикла. Отработанный раствор концентрируется путем выпаривания, чтобы обеспечить поступление промывочной воды на стадии удаления остатков.

Более 30% алюминатного раствора может содержаться в шламе из-под сгустителя, перед сбросом отработанного материала на шламовое поле необходимо вернуть в производство щелочно-алюминатный раствор, уносимого сгущенным шламом из конусов сгустителей методом промывки. По теоретическим данным при нормальной работе промывателей понижение концентрации щелочи в промывной воде каждого последующего ряда должно быть более, чем в 2 раза. Производительность сгустителей и промывателей определяется по сливу (м^3) и съему шлама (кг) с квадратного метра площади отстаивания в единицу времени ($\text{м}^3/\text{м}^2\text{час}$; $\text{кг}/\text{м}^2\text{час}$).

1.4 Общая теория процессов разделения твердой и жидкой фазы

1.4.1 Гравитационное осаждение

Гравитационное осаждение используется для разделения твердой и жидкой фракции суспензий перед следующим этапом фильтрации в процессе параллельного Байер – спекание для получения глинозема из бокситов [60]. Основным материальным потоком в процессе сгущения является осветленный алюминатный раствор, который направляют на последующий этап фильтрации. Сгущенная пульпа – КШ, направляется на этап промывки для отделения остаточных полезных веществ и уменьшения концентрации щелочи.

На процесс осаждения влияет несколько факторов, включая размер и форму частиц, распределение по размерам, разность плотностей (твердой и жидкой), концентрацию суспензии и свойства поверхности, такие как химическое содержание, химические добавки и суспензионная среда. Из-за этих особенностей твердые частицы испытывают осаждение в виде частиц или препятствий (перемещение агрегатов). Если частицы, составляющие суспензию, мелкие, оседание происходит довольно медленно, и для достижения разделения требуются специальные методы. Из-за медленной скорости оседания, которая обычно встречается, требуется сравнительно большое оборудование [29].

Современные исследования показывают, что флокуляция – ключевой процесс, обеспечивающий формирование крупных агрегатов, способных осаждаться быстрее и минимизировать потери твердой фазы. Эффективность флокуляции напрямую зависит от дозировки флокулянтов, степени их взаимодействия с частицами, а также гидродинамических условий в рабочей зоне питающего стакана [81].

Седиментацию в однокамерном радиальном промывателе можно разделить на зоны, соответствующие зонам протекающих в нем подпроцессов: зоны осветленного раствора, флокуляции, свободного осаждения, стесненного осаждения, а также зону уплотнения осадка (рисунок 1.4).

В зоне осветленного раствора могут встречаться индивидуальные частицы, которые могут оседать или подниматься в стоковом режиме. В зоне флокуляции происходит укрупнение частиц за счет мостиковых соединений, что увеличивает эффективность разделения. В зонах свободного и стесненного осаждения в идеальных условиях частицы имеют равномерную скорость, не зависящую от гранулометрического состава. В зоне уплотнения частицы образуют структурную сеть, которая способна выдержать сжимающие силы. Структура уплотненных частиц имеет низкий предел текучести, а рост веса частиц с увеличением глубины приводит к уменьшению порозности слоя [84; 95].

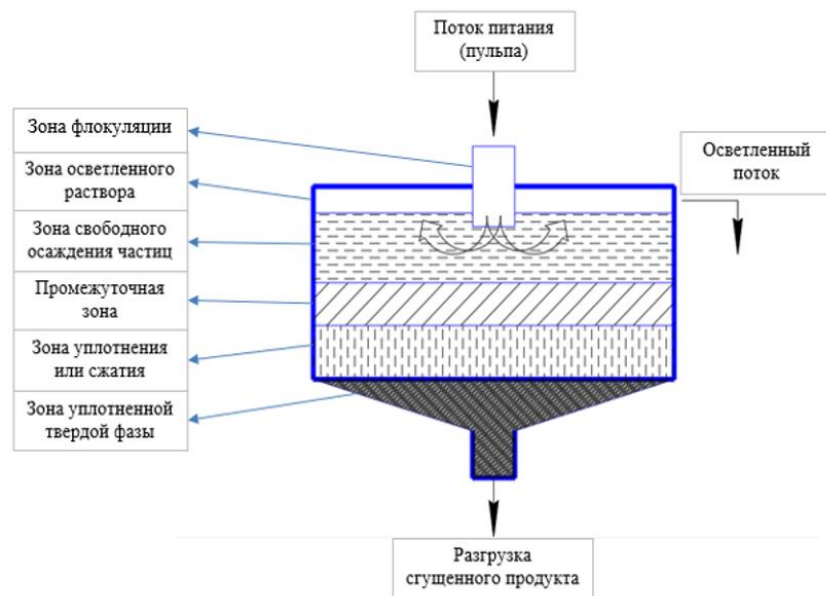


Рисунок 1.4 – Схема разделения фаз в радиальном однокамерном промывателе.

Материалы автора

На практике в процессах сгущения и промывки используют флокулянты или коагулянты для отделения твердых мелкодисперсных частиц из суспензии, если скорость осаждения данных частиц существенно мала, для того чтобы обеспечить эффективное разделения фаз.

1.4.2 Процесс укрупнения твердой мелкодисперсной фазы

Процессы укрупнения и разрушения частиц являются фундаментальными для дисперсных систем, определяя их динамические и структурные свойства. Значительная часть мелкодисперсной твердой фракции может находиться в коллоидном состоянии. Различные механизмы взаимодействия частиц, такие как агрегация, коагуляция, флокуляция и дефлокуляция, протекают в системах с различной природой внешних воздействий, определяя эффективность операций осаждения и концентрирования.

Агрегация представляет собой укрупнение частиц вследствие их взаимодействия и формирования агрегатов под воздействием межчастичных сил. В гидрометаллургических процессах, например, при осаждении шламов после кислотного выщелачивания, агрегация частиц возникает под влиянием Ван-дер-Ваальсовых сил и других молекулярных взаимодействий. При этом кинетика процесса определяется концентрацией твёрдой фазы, размером частиц и турбулентностью среды.

Процесс агрегации можно условно разделить на перенос частиц и слипание. При низких концентрациях твёрдой фазы механизм диффузионного столкновения становится доминирующим, в то время как на более высоких концентрациях решающее значение приобретает гидродинамическое взаимодействие [49]. Например, в процессе нейтрализации

растворов, содержащих железо и алюминий, образуются агрегаты гидроксидов, которые постепенно осаждаются, обеспечивая разделение твёрдой и жидкой фаз.

Коагуляция – это процесс укрупнения частиц путём нейтрализации их поверхностного заряда. В гидрометаллургии коагуляция часто используется для осаждения коллоидных частиц из растворов, где высокая устойчивость дисперсной фазы препятствует эффективному разделению фаз. Добавление коагулянтов (например, солей алюминия – $Al_2(SO_4)_3$ или железа – $FeCl_3$ приводит к сжатию двойного электрического слоя вокруг частиц и снижению энергетического барьера для их слипания.

Механизм коагуляции можно описать через теорию быстрой и медленной коагуляции Смолуховского (1917) [8]. В условиях интенсивного перемешивания частицы сталкиваются с высокой частотой, и коагуляция происходит на границе перехода между режимами ламинарного и турбулентного течения. Например, в процессе осаждения при очистке растворов серной кислоты, содержащих мелкодисперсные частицы сульфатов, коагуляция является необходимым этапом формирования крупных агрегатов, способных к эффективной седиментации.

Флокуляция представляет собой процесс образования рыхлых агрегатов – флокул, объединяющих частицы за счёт высокомолекулярных флокулянтов. В отличие от коагуляции, где укрупнение определяется поверхностным зарядом, флокуляция осуществляется через мостиковый механизм, когда полимерные цепи флокулянта адсорбируются на поверхности частиц и соединяют их в более крупные структуры.

В гидрометаллургии флокуляция играет ключевую роль при осаждении шламов в промывателях и сгустителях. Например, применение анионных полиакриламидов в операциях сгущения позволяет ускорить осаждение частиц гидроксидов металлов, образующихся при нейтрализации кислых растворов. Флокулы, образованные в процессе флокуляции, обладают высокой пористостью, что способствует эффективному выделению жидкой фазы. Механизм флокуляции можно представить следующими этапами:

- Адсорбция флокулянта на поверхности частиц.
- Формирование мостиковых связей между частицами.
- Рост флокул под воздействием гидродинамических условий.

Эффективность флокуляции определяется природой и дозировкой флокулянта, а также параметрами среды, такими как ионная сила, pH и интенсивность перемешивания [86]. Например, оптимальный подбор флокулянтов в процессе осветления растворов при переработке бокситов позволяет сократить время осаждения красного шлама.

Флокулянты или коагулянты нейтрализуют силу, препятствующую слипанию частиц друг с другом, что повышает последующее осаждение укрупнённых частиц. Несмотря на то, что

флокуляция и коагуляция ведут к образованию укрупненных агрегатов (флокул) под действием сил сцепления, они имеют различный принцип работы.

Коагулянты нейтрализуют электрический заряд частиц, т.е. частицы теряют заряд, что повышает их способность сталкиваться друг с другом и образовывать более тяжелые и крупные соединения. Флокулянты объединяют частицы путем образования полимерных мостиков, флокулы укрупняются и оседают под действием сил гравитации [90].

Флокуляция в первую очередь определяется типом и дозировкой химических агентов, добавляемых для начала коагуляции и флокуляции частиц. Второстепенными факторами являются более традиционные физические параметры (например, перемешивание, температура и т. д.). Характеристика стабильности жидкого флокулянта, кинетики смешивания, однородности и конечной концентрации так же важна при характеристике процесса, как и при более очевидных целях инженерии частиц (например, распределение частиц по размерам и их количество). Добавленные флокулянты или вспомогательные вещества также должны быть охарактеризованы с точки зрения их влияния на результат флокуляции, а также кинетики процесса и нормативных последствий.

Флокуляция широко используется в качестве предварительной обработки для улучшения скорости оседания и проницаемости суспензий твердых частиц в процессе сгущения. После флокуляции и отстаивания последующая скорость и степень консолидации осадка напрямую связаны с пропускной способностью и концентрацией твердых частиц в нижнем потоке сгустителя. Однако структурные изменения в осадке, способствующие уплотнению в процессе сгущения, особенно в режимах низкого сдвига и сжатия, изучены недостаточно. Это означает, что связь между микромасштабными свойствами осадка и его макромасштабной реакцией на обезвоживание отсутствует, и это является основным препятствием для разработки надежной и физически обоснованной модели процесса сгущения [82].

Дефлокуляция представляет собой процесс разрушения флокул и обратного диспергирования частиц. Она может быть вызвана как механическим воздействием, так и изменением химических условий среды. В гидрометаллургии дефлокуляция является нежелательным явлением в операциях осаждения, так как приводит к уменьшению размеров агрегатов и снижению их скорости седиментации [69].

Например, при интенсивном перемешивании в питающих стаканах сгустителей образованные флокулы могут разрушаться, что требует корректировки режима перемешивания и дозировки флокулянтов для предотвращения дефлокуляции. С другой стороны, управляемая дефлокуляция применяется при подготовке дисперсных систем для дальнейшего перераспределения и переработки, например, при производстве пульпы и суспензий.

В работе [75] рассматривается влияние скорости агрегации минеральных частиц на эффективность процессов разделения. Авторы установили, что параметры, такие как дозировка флокулянта и концентрация частиц, оказывают значительное влияние на данный процесс. Для построения прогностической модели использовался метод опорных векторов, а его настройка осуществлялась с применением алгоритма оптимизации роя частиц. Проведённые экспериментальные испытания продемонстрировали высокую точность модели: предсказанные значения скорости флокуляции оказались согласованными с экспериментальными результатами. Таким образом, предложенный подход можно рассматривать как эффективный инструмент для оценки динамики флокуляции минеральных компонентов в водной среде.

1.5 Промыватель – однокамерный радиальный сгуститель

На отечественных предприятиях процесс промывки проводят в цепочке одноярусных радиальных промывателях. Материальными потоками в процессе промывки являются: сгущенная пульпа, промывная вода и флокулянт. Сгущенная пульпа – шлам, направляется на этап промывки с этапа сгущения для отделения остаточных полезных веществ и уменьшения концентрации щелочи. Промывная вода подается в противоток промывного узла для выноса остаточных полезных веществ и щелочи. Флокулянт – вещество, интенсифицирующее процесс осаждения твёрдой фазы шлама в процессе осаждения. Одноярусный радиальный сгуститель является инерционным объектом, время инерции по некоторым каналам управления может достигать 6 – 12 часов. Непрерывное сгущение для обеспечения требуемой концентрации твердых частиц в нижнем потоке зависит от баланса между объемным расходом твердых частиц при критической концентрации и диаметром сгустителя.

Промыватель – однокамерный радиальный сгуститель с центральным приводом предназначен для сгущения и обесшламливания пульп и суспензий, осветления оборотной воды и растворов, а также в качестве технологического оборудования при гидрометаллургическом процессе обогащения руд цветных металлов. Применяется на горно-обогатительных комбинатах, предприятиях металлургической, угольной, химической и в других отраслях промышленности.

Существуют следующие типы промывателей, используемые в технологии противоточной декантации:

Радиальные сгустители: классические аппараты, в которых осветлённая жидкость отводится через верхний перелив, а сгущённый осадок собирается в центре и удаляется через нижний слив. Они широко применяются благодаря простой конструкции и надёжности.

Многоярусные сгустители: обладают несколькими ярусами, что позволяет проводить последовательное сгущение и промывку осадка в одном аппарате. Это повышает эффективность процесса и снижает занимаемую площадь. В таких сгустителях осадок перемещается сверху

вниз, контактируя с противотоком промывной жидкости, что обеспечивает более полное удаление растворённых веществ.

Тонкослойные сгустители: используют принцип осаждения частиц в тонких слоях, что ускоряет процесс сгущения и уменьшает размеры оборудования. Они эффективны при работе с суспензиями, содержащими мелкие частицы, и позволяют достичь высокой степени осветления жидкости.

Высокоскоростные сгустители: обеспечивают интенсивное сгущение за счёт ускоренной флокуляции и оптимизированной гидродинамики. Конструкция питающего стакана позволяет равномерно распределять суспензию и образовывать плотные флокулы, что значительно сокращает время осаждения и повышает производительность аппарата при компактных размерах.

Для повышения эффективности осаждения и уменьшения объёмов жидкой фазы в промышленной практике получили развитие несколько более совершенных типов сгустителей. высокоинтенсивные сгустители обладают усовершенствованной системой подачи исходной пульпы (например, с помощью специального питателя и эффективных механизмов распределения флокулянтов), что повышает скорость седиментации и позволяет получать более густую осадочную зону. Следующим шагом стали сгустители повышенной плотности, которые за счёт более мощных мешалок, тщательно спроектированных конусовидных оснований и оптимизированного режима дозировки флокулянтов обеспечивают ещё более высокую концентрацию твёрдого вещества в осадке, нередко превышающую 60–65 %.

Компании Rio Tinto (ранее Alcan), Hydro, а также крупные инжиниринговые фирмы (Outotec, FLSmidth) разрабатывают и внедряют оборудование для подобных высокоплотных и пастовых технологий сгущения. Обширные доклады и обзоры, отражающие мировой опыт сокращения жидкой фазы в красных шламах, регулярно публикуются в материалах Международного комитета по изучению бокситов, глинозёма и алюминия (ICSOBA) и ежегодных сборниках «Light Metals» TMS (The Minerals, Metals & Materials Society). Упоминаются также результаты конкретных исследований, в частности работа К. Эванса [37], где представлен детальный анализ эволюции методов переработки и складирования глинозёмных отходов. Помимо экологических преимуществ, позволяющих избежать крупных гидравлических хвостохранилищ и снизить риск утечки щёлочного раствора, методы сухого складирования помогают возвращать в процесс больший объём ценного раствора с каустической содой, что повышает общую экономическую эффективность. Наиболее прогрессивным направлением в контексте «сухого» складирования считается использование пастовых сгустителей. При работе таких установок осадок приобретает характерную пастообразную консистенцию с минимальным количеством свободной воды. Подобная степень уплотнения, достигающая нередко 70% твёрдой

фазы и выше, позволяет транспортировать шлам насосами при одновременном существенном снижении риска разжижения в отвалах.

На исследуемом предприятии в ветке промывки шлама используется классический одноярусный радиальный сгуститель с центральным приводом. Такой аппарат обеспечивает надёжный и относительно простой в эксплуатации процесс сгущения, однако ограничивает возможности по дальнейшему сокращению объёмов жидкой фазы и повышению концентрации твёрдой фазы. Ранее в алюминиевой промышленности применялись многоярусные сгустители, позволявшие проводить последовательное осаждение и промывку осадка в одном агрегате. Несмотря на более высокую эффективность, такие сгустители требуют сложного управления и точной настройки систем автоматизации, поэтому на практике часто предпочитают традиционную радиальную конструкцию, как более устойчивые к изменениям потока питающей пульпы.

1.6 Питающий стакан

Питающий стакан расположен в центре резервуара промывателя и служит точкой ввода пульпы. Его основная функция – равномерно распределять поступающую суспензию по поверхности промывателя, обеспечивая равномерное осаждение и минимизируя турбулентность. Дозирование рабочего раствора флокулянта ведется согласно рекомендациям производителя в два приема. Первая добавка флокулянта к пульпе КШ производится в питающий трубопровод и контролирует чистоту слива. Вторая добавка флокулянта производится в питающий стакан аппарата и позволяет контролировать скорость осаждения и уплотнение шлама.

Классический цилиндрический питающий стакан

Классический цилиндрический питающий стакан – стандартная конструкция, в которой пульпа поступает в цилиндрический стакан и распределяется радиально по сгустителю (рисунок 1.5). Цель такой конструкции – равномерно распределить пульпу и минимизировать турбулентность. Главным преимуществом является простота конструкции и универсальность для различных типов пульпы. В свою очередь, при неравномерном потоке пульпы может возникать повышенная турбулентность, что может привести к разрушению флоккул и снижению эффективности осаждения.

Питающий стакан с юбкой на валу

Юбка представляет собой коническую или цилиндрическую деталь, закрепленную на валу в центре стакана (рисунок 1.6). Она помогает направить поток пульпы и снизить интенсивность турбулентности, создавая более стабильные условия для флокуляции. Основным преимуществом данного типа конструкции является уменьшение турбулентных потоков, что улучшает условия для формирования флоккул, обеспечивает плавное распределение пульпы в сгустителе.



Рисунок 1.5 – Классический цилиндрический питающий стакан. Материалы по результатам производственной стажировки



Рисунок 1.6 – Питающий стакан с юбкой на валу. Материалы РУСАЛ Windalco

Питающий стакан с сеткой

Сетка размещается на выходе из питающего стакана и используется для равномерного распределения пульпы (рисунок 1.7). Она работает как диффузор, уменьшая интенсивность турбулентных потоков.



Рисунок 1.7 – Питающий стакан с разделительной сеткой. Материалы РУСАЛ Windalco

Питающий стакан с сеткой позволяет эффективно распределять поток, минимизировать зону с высокой концентрацией твердых частиц. Основным недостатком является то, что сетка может засоряться, что требует регулярного обслуживания.

Питающий стакан с восходящим конусом

Восходящий конус используется для создания двух отдельных зон: зоны для диссипации энергии и зоны для флокуляции. Конус направляет поток пульпы вверх, что способствует снижению скорости потока и улучшению условий для агломерации частиц. Основное преимущество – разделение на две зоны, которое обеспечивает лучшее смешение флокулянта и снижает внешнее воздействие на флокулы. Однако, конструкция сложнее вышеописанных вариантов, что требует точной настройки и правильного позиционирования, чтобы обеспечить эффективное разделение зон осаждения [93].

Питающий стакан с дефлекторами (лопастями)

Лопасты или дефлекторы размещаются внутри питающего стакана для направления и регулирования потоков пульпы. Они предназначены для минимизации завихрений и создания более равномерного распределения потока. Подобная конструкция позволяет достичь равномерного распределения пульпы и более эффективного осаждения. Лопасты также могут уменьшать интенсивность турбулентных потоков. Для того, чтобы избежать засорения или повреждения лопастей необходим регулярный контроль и обслуживание.

Классический цилиндрический стакан наиболее прост в использовании и обслуживании, но из-за высокой турбулентности подходит не для всех условий. Эта конструкция может приводить к разрушению флокул, что снижает эффективность осаждения. Юбка на валу и сетчатые стаканы помогают уменьшить турбулентность, что улучшает процесс флокуляции. Сетчатая конструкция может дать очень хорошие результаты, но требует регулярного обслуживания, чтобы избежать засорений. Восходящий конус и лопасти (дефлекторы) являются наиболее продвинутыми решениями, так как они помогают создать зоны с различными условиями для флокуляции и диссипации энергии, что значительно повышает эффективность процесса. Однако такие конструкции являются сложными в проектировании и требуют точной настройки и контроля во время эксплуатации [74].

Выбор конструкции питающего стакана зависит от конкретных условий работы сгустителя, таких как тип пульпы, концентрация твердых частиц, скорость потока и требуемая степень осветления. Использование CFD для моделирования различных конструкций помогает оценить и выбрать наиболее эффективное решение в зависимости от конкретных технологических требований.

В исследовании, опубликованном в журнале *Minerals* в 2023 году [87], изучается влияние различных типов конических дефлекторов на распределение флокул в питающем стакане.

Флокулянт вводился непосредственно перед питающим стаканом, что приводило к значительному содержанию остаточного флокулянта в стакане. Результаты показали, что изменение конструкции дефлектора влияет на эффективность флокуляции и распределение флокул.

В настоящее время существует ряд исследований, посвящённых моделированию работы питающего стакана сгустителя. Эти работы используют методы вычислительной гидродинамики (CFD) и модели популяционного баланса (МПБ) для анализа и оптимизации конструкции питающего стакана, а также для улучшения процессов флокуляции и осаждения частиц.

В работе, представленной на конференции MetPlant 2013 [55], описывается разработка открытого ящика для смешивания и разведения флокулянта, заменяющего традиционный коллектор. Это улучшение позволило оптимизировать смешивание, упростить диагностику неисправностей и контролировать распределение флокулянта по различным точкам дозирования. Добавление флокулянта в поток разбавления перед смешиванием со шламом обеспечило сверхразбавление флокулянта, что улучшило процесс флокуляции и снизило его потребление. Статья [87] описывает исследование, направленное на понимание и моделирование процессов флокуляции, происходящих в питающем стакане сгустителя, с использованием объединенной модели вычислительной гидродинамики (CFD) и МПБ. Такое моделирование помогает анализировать, как процессы перемешивания и взаимодействия частиц влияют на эффективность сгущения [21; 65]. Создание модели, способной адекватно описать процессы формирования флокул, позволяет оптимизировать конструкцию и условия эксплуатации питающего стакана для улучшения работы всего сгустителя. В статье обнаружено, что оптимальная доза флокулянта и низкий уровень турбулентности приводят к образованию более крупных и устойчивых флокул, что улучшает эффективность осаждения в сгустителе. Авторы приводят рекомендации по оптимизации конструкции питающего стакана, чтобы обеспечить лучшие условия для флокуляции и осаждения. Среди таких рекомендаций – уменьшение турбулентности в зоне подачи флокулянта и поддержание равномерного распределения пульпы. Результаты моделирования показывают, что правильный выбор геометрии питающего стакана может значительно снизить потери флокул и повысить концентрацию осадка в нижней части сгустителя [64].

Статья [40] посвящена исследованию конструкции питающего стакана с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) для оптимизации его работы в промышленных условиях. В работе применяется подход Эйлера–Эйлера с использованием модели турбулентности RNG $k-\epsilon$ для описания двухфазного течения пульпы в питающем стакане в стационарных условиях. Для моделирования агрегации и разрушения флокул используется модель популяционного баланса, что позволяет более точно описать процессы флокуляции

внутри питающего стакана. Исследуются различные варианты конструкции питающего стакана с лопастями для улучшения его производительности. Особое внимание уделяется таким параметрам, как скорость на выходе, скорость диссипации турбулентной энергии и расход пульпы. Результаты моделирования сопоставляются с эксплуатационными данными минерального предприятия, демонстрируя разумное согласие между моделью и реальными показателями. На основе полученных данных предлагаются рекомендации по оптимизации конструкции питающего стакана для повышения эффективности процессов флокуляции и осаждения твердых частиц.

Численные симуляции потоков в питающих стаканах различной конструкции позволяют определить оптимальные параметры для улучшения гидравлической эффективности. Это включает в себя анализ различных геометрических конфигураций и их влияние на распределение потоков и эффективность осаждения [35]. Создание инновационных конструкций, таких как питающие стаканы с внутренними желобами для распределения пульпы, направлено на улучшение смешивания и равномерного распределения твёрдых частиц. Моделирование и последующие испытания таких конструкций показывают улучшение производительности сгустителей [97]. Статья [41] посвящена экспериментальной валидации моделей сгущения и питающих стаканов, разработанных с использованием CFD, в рамках проекта AMIRA P266 «Improving Thickener Technology».

В исследовании [28] предложена усовершенствованная модель флокуляции, ориентированная на аппараты с ограниченным временем удержания, что позволяет более точно прогнозировать поведение системы. Это особенно актуально для конструкций с коротким временем контакта, таких как флокуляторы с закрученной трубой. Экспериментальные данные показали, что модель превосходит по точности традиционные подходы, применяемые ранее.

1.7 Анализ существующих систем управления технологическим процессом противоточной промывки

В отличие от нефтехимической и целлюлозно-бумажной промышленности, отрасль переработки твердых полезных ископаемых очень медленно внедряла технологии автоматизации. Однако в последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к интенсификации их использования. Актуальным направлением в настоящий момент является синтез моделей ОУ с целью создания на базе этих моделей программных тренажеров, прогнозирующих моделей, экспертных систем для внедрения в классическую структуру АСУ ТП. Внедрение цифровых систем в металлургических производствах является одним из приоритетных направлений современных исследований [14]. Однако существующие модели управления не полностью учитывают возмущающие воздействия, такие как распределение

частиц по размерам в питающей пульпе, размер и форма флокулируемых частиц, а также проблемы зарастания и зашламливания сгустителей.

В научно-технической литературе практически отсутствуют данные об использовании систем управления с прогнозирующими моделями для процессов сгущения красного шлама. Аналогичная ситуация наблюдается и в контексте снижения потерь щелочных реагентов в процессе переработки бокситов методом Байера, где значительный резерв для оптимизации заключается в доизвлечении щелочи из красного шлама и ее возврате в основное производство. Исследования в этой области создают теоретическую и практическую базу для совершенствования систем управления процессами противоточной промывки, сгущения и переработки вторичных продуктов, таких как красный шлам. Развитие моделей, основанных на массовом балансе, исследование физико-химических свойств материалов и внедрение прогнозирующих стратегий управления являются важными шагами для повышения эффективности и экологичности этих процессов.

Процесс промывки характеризуется нелинейностью, большой инерционностью и запаздыванием по большинству каналов управления, высокой корреляцией параметров между собой, что делает его сложноуправляемым при постоянно действующих возмущениях, таких как: расход КШ в питании сгустителя, диаметр и форма сфлуккулированных частиц, распределение частиц по размерам в питающей пульпе и на выходе из питающего стакана после процесса флокуляции и т.д.

Исследования О.В. Саламатова и В.И. Саламатова сосредоточены на анализе процессов сгущения и промывки красного шлама из низкокремнистых бокситов [81]. В проведённом исследовании основное внимание уделено анализу процессов сгущения и промывки красного шлама, получаемого при переработке низкокремнистых бокситов. Определены ключевые факторы, оказывающие влияние на эффективность операций: расход промывной воды, соотношение Ж/Т, число стадий промывки и концентрация алюминатного раствора. Эксперименты с шламами, включая пробы с Богословского завода и Североуральского месторождения, подтвердили, что увеличение этапов промывки снижает потери алюминия благодаря росту отношения Ж/Т и повышению производительности.

По мере прохождения пульпы по последовательным стадиям сгущения весовое соотношение Ж/Т постепенно уменьшается, при этом количество жидкости, связанной с одной тонной твёрдого остатка, практически не изменяется. Результативность процесса определяется оптимальным числом стадий и эффективным расходом промывной воды. В статье [43] авторы предложили физическую модель, описывающую физико-химические характеристики процесса сгущения. В работе [89] исследуется влияние флокулянтов на осветление пульпы и ускорение

осаждения, что подчеркивает важность выбора реагентов для повышения эффективности процессов.

В работе [62] предложена структура прогнозного управления для процессов противоточной промывки, основанная на многопараметрическом анализе. Основное внимание уделяется параметрам, таким как скорость потока, концентрация твердой фазы и расход воды. Разработанная прогнозная модель управления продемонстрировала высокую адаптивность к изменениям состава питающей пульпы, минимизируя потери ценных компонентов. Для повышения точности управления предложено использование датчиков для оценки границы раздела фаз. Однако авторы подчеркивают, что такие датчики имеют ограничения, связанные с высокой стоимостью и необходимостью работы в агрессивной среде. Это исследование акцентирует важность разработки экономически эффективных альтернативных решений.

В работе [103] рассматривается применение систем управления с обратной связью для минимизации потерь щелочных растворов в процессе промывки красного шлама. Система использует данные о концентрации щелочи в жидкой фазе и соотношении жидкость-твердое (Ж/Т) для оперативной корректировки параметров процесса. Это позволило увеличить возврат щелочи в процесс на 12%, что подтверждает эффективность предлагаемого подхода. Авторы акцентируют внимание на значении интеграции таких систем в существующую инфраструктуру, что способствует снижению затрат и повышению экологической устойчивости производства.

В статье [30] исследовали применение методов машинного обучения для управления процессом противоточной промывки. Разработанная система прогнозировала распределение частиц по размерам и эффективность флокуляции, что способствовало повышению точности управления. Одним из ключевых преимуществ системы является ее интеграция с существующими АСУ ТП, что обеспечило снижение энергозатрат и повышение стабильности процесса. Авторы отмечают, что использование алгоритмов машинного обучения позволяет учитывать сложные взаимосвязи между параметрами процесса, улучшая контроль и управление.

Концепция управления процессами осаждения и флокуляции в сгустителях получила значительное развитие в последние годы благодаря исследованиям, направленным на моделирование, анализ и разработку стратегий управления. В материалах статьи [22] исследователи сосредоточились на моделировании и управлении осветлителей и сгустителей, питаемых суспензиями с изменяющимися во времени свойствами. Разработанные ими модели описывают изменения скорости осаждения и концентрации частиц, предоставляя инструменты для эффективного управления технологическим процессом. В частности, авторы предложили подходы, основанные на контроле массового баланса, которые стабилизируют процесс и минимизируют влияние возмущений [66; 101].

Работа [25] посвящена извлечению редкоземельных элементов и других ценных металлов из красного шлама, остающегося после переработки бокситов. В исследовании рассматриваются различные гидрометаллургические и пирометаллургические методы, включая кислотное выщелачивание и высокотемпературное восстановление. Их анализ подчеркивает перспективы оптимизации существующих технологий для повышения экономической и экологической эффективности производства.

Исследования [26] сосредоточены на капиллярных течениях суспензий, которые демонстрируют дискретное утолщение сдвига. Разработанные ими модели описывают физико-химические свойства таких суспензий, включая вязкость и межчастичное взаимодействие, а также предлагают методы анализа, которые могут быть использованы для изучения влияния этих эффектов на производственные процессы. Это открывает новые перспективы для управления транспортными и технологическими операциями, связанными с переработкой суспензий.

Авторы статьи [3] описали разработку автоматизированной системы дозирования флокулянта, основанной на модели кинетики агрегации. Система учитывала изменения качества боксита, поступающего в процесс, что является критически важным для стабильности технологического режима. Применение данной системы позволило снизить влияние колебаний качества сырья на параметры процесса, улучшив его управляемость. Авторы подчеркивают важность учета кинетики агрегации для разработки эффективных систем автоматизации в гидрометаллургии.

В статье [23] авторы исследовали возможности оптимизации расхода промывной воды в процессах противоточной промывки. Разработанная система управления, основанная на оптимизационных алгоритмах, позволила сократить потребление воды на 8% без снижения качества промывки. Исследование акцентирует внимание на необходимости рационального использования водных ресурсов в условиях современных требований к устойчивому развитию. Авторы отметили, что внедрение таких систем особенно эффективно на крупных промышленных предприятиях.

В области автоматизации процессов противоточной промывки разработано множество патентов, которые направлены на повышение эффективности, надежности и качества управления технологическими процессами. Эти разработки охватывают как методы управления многосекционными промывными установками, так и усовершенствованные конструкции оборудования.

Патент US6562238B1 описывает метод и устройство для управления многосекционной противоточной промывкой, в которой исходный раствор в твердом осадке замещается промывочным растворителем. В основе системы лежит использование математической модели, которая позволяет предсказывать и регулировать потоки промывочного растворителя в

зависимости от скорости подачи материала. Это обеспечивает точное поддержание требуемой концентрации исходного растворителя в конечном продукте, минимизируя потери ценных компонентов. Таким образом, система позволяет повысить общую эффективность процесса и снизить затраты на реагенты [38].

Российский патент RU1773433C предлагает метод управления противоточной промывной установкой, оснащённой комбинированным аппаратом типа смеситель-отстойник. Эта система контроля позволяет регулировать ключевые параметры процесса, такие как расход суспензии, концентрация остаточной жидкости и промывного раствора. Поддержание оптимальных условий промывки способствует повышению качества отделения жидкой фазы от твердой, а также снижает потери растворенных ценных компонентов. Данный подход также улучшает управляемость процесса при изменении характеристик питающего потока [11].

В патенте RU2064325C1 представлен автоматический самоочищающийся фильтр, оснащённый системой противоточной промывки для регенерации фильтрующих элементов. Устройство включает поворотный патрубок, запорный элемент и автоматический блок управления, что обеспечивает высокую надежность работы оборудования даже в условиях высоких нагрузок. Применение такой технологии позволяет значительно повысить продолжительность эксплуатации фильтров и снизить затраты на их обслуживание [2].

Патент SU1679972A3 описывает многосекционную установку противоточной промывки, которая предназначена для использования в химической промышленности. Установка включает в себя сосуд с зумпфами и демонстрирует высокую энергоэффективность за счет использования инновационной компоновки и конструктивных решений. Такое оборудование позволяет существенно сократить энергозатраты при обеспечении высокой компактности и производительности процесса [17].

Одна из выделяемых проблем управления процессом это зависимость проведения процесса от качества поступающего на обработку боксита. От качества сырья напрямую зависят экономические затраты на флокулянт. В работе [57] был предложен способ разработки статистической модели для прогнозирования полевых характеристик шлама с использованием данных лабораторных испытаний. В исследовании [103] чтобы уменьшить влияние неопределенности гранулометрического состава сырья, поступающего на производство, предложена стохастическая оптимизация с ограничением случайности. В исследовании [100] чтобы уменьшить влияние неопределенности гранулометрического состава сырья, поступающего на производство, предложена стохастическая оптимизация с ограничением случайности.

В статье [101] стабильность работы сгустителя была рассмотрена с учетом скоростных распределений питающего потока. С одной стороны, если скорость потока слишком низкая, это

может привести к перегрузке сгустителя и потере ценных веществ при достаточно высоком уровне слоя осаждённого шлама. Авторы предлагают стратегии по оптимальному управлению с обратной связью по характеристикам и внедрение «экспертной» системы. В данном случае учитываются характеристики крутящего момента граблин, мутность перелива, уровень осаждённого шлама и массовая доля твердых частиц в отгружаемом потоке. С помощью контроля мутности слива осветленного продукта сгустителя можно также избежать потери частиц целевого продукта.

В статье [92], посвящённой противоточной декантации в медной металлургии, представлены методы определения оптимального количества сгустителей в промывочном цикле. Отмечается, что увеличение числа последовательно включённых аппаратов повышает эффективность удаления примесей из пульпы.

В исследовании, посвящённом применению сгустителей высокой плотности в процессе противоточной промывки на предприятии Ruashi II, рассматриваются пути повышения эффективности извлечения меди. Основное внимание уделяется сокращению объёмов раствора, выходящего из нижней части сгустителя, что способствует более полному извлечению растворённых металлов и позволяет уменьшить количество этапов промывки [36]. Результаты моделирования свидетельствуют о том, что при использовании сгустителей высокой плотности возможно снизить количество стадий промывки с пяти до четырёх без потери извлекаемости меди, что ведёт к сокращению как капитальных, так и эксплуатационных затрат.

1.8 Системы усовершенствованного управления технологическим процессом

противоточной промывки КШ

Системы усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП) представляют собой расширение возможностей классических АСУ ТП. Их цель заключается в реализации более сложных методов управления, включая прогнозирование, оптимизацию и адаптацию, что позволяет существенно повысить эффективность работы технологического оборудования. Согласно рекомендациям ГОСТ, СУУ ТП интегрируются на более высоком уровне иерархии управления, обеспечивая связь между уровнями оперативного и стратегического контроля (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Типовая структура уровней автоматизации

Согласно типовой структуре АСУ ТП, уровень СУУ ТП располагается между уровнями управления оборудованием (PLC, SCADA) и системами производственного управления (MES). На этом уровне происходит сбор, обработка и анализ данных, а также принятие решений для оптимального управления технологическими процессами. Такой подход обеспечивает двусторонний обмен информацией: данные с нижнего уровня (состояние датчиков, исполнительных устройств) передаются на верхний, а стратегические указания с верхнего уровня транслируются в конкретные управляющие воздействия (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Отличия СУУ ТП от классической АСУ ТП

Критерий	Классическая АСУ ТП	СУУ ТП
Архитектура	Централизованная	Гибкая распределённая
Модель управления	Реактивная, основана на заранее заданных алгоритмах	Прогнозирующая, с возможностью оптимизации в реальном времени
Датчики	Физические, измеряющие конкретные параметры	Программно-управляемые, основанные на моделях
Обработка данных	Фиксированные параметры управления	Непрерывная, с обучением на исторических данных
Влияние операторов	Ручная настройка параметров, высокая зависимость от человека	Минимизация человеческого вмешательства
Интеграция	Ограниченная интеграция с другими системами	Полная интеграция с MES/ERP (ISA-95)
Адаптивность	Ограниченная	Высокая, учитывает изменения внешних и внутренних условий
Принятие решений	Статичное, по правилам	Использует интеллектуальные алгоритмы и машинное обучение

Функциональная структура СУУ ТП-О-системы включает в себя ряд взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполняет специализированные задачи, направленные на поддержание устойчивости, оптимальности и эффективности технологического процесса (рисунок 1.9).

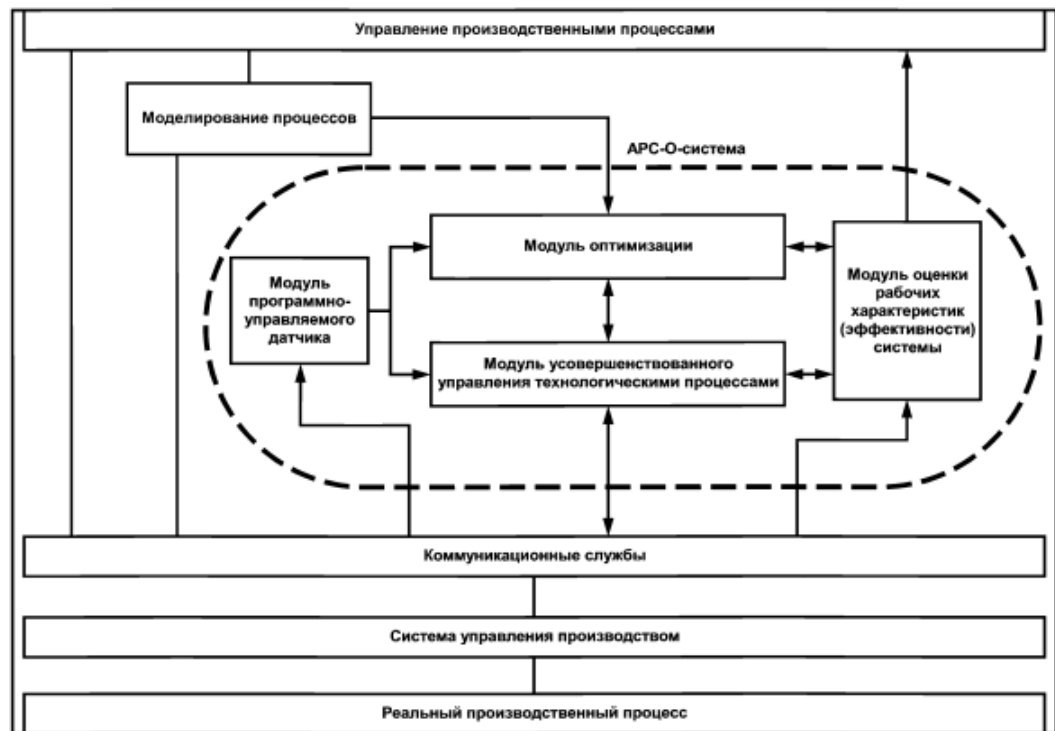


Рисунок 1.9 – Функциональная архитектура СУУ ТП и оптимизации (APC-O) [15]

Ключевым компонентом является программно-управляемый датчик, выполняющий роль виртуального измерителя. В отличие от традиционного физического датчика, он осуществляет расчёт технологических параметров на основе встроенной математической модели, отражающей динамику объекта. Это позволяет существенно увеличить частоту получения измерений и устранить инерционность, присущую лабораторным и поточным анализаторам.

СУУ ТП-модуль реализует методы точного и адаптивного регулирования. В отличие от классических систем управления с обратной связью, этот модуль принимает решения на основе анализа текущих и прогностических данных, поступающих от других компонентов системы. Он обеспечивает передачу управляющих воздействий как на нижний уровень (уровень регуляторов 2-го порядка), так и на вспомогательные модули.

Модуль оптимизации играет центральную роль в адаптивной корректировке параметров производственного процесса. Он нацелен на достижение предельных технологических показателей (например, минимизация потребления реагентов, максимизация извлечения целевого компонента) с учётом производственных ограничений. В своей работе модуль опирается на математическую модель объекта управления, которая может быть аналитической, численной либо основанной на данных (data-driven).

Входные данные, поступающие в модуль оптимизации, включают информацию от всех компонентов системы. Его выходные сигналы направляются на настройку регуляторов и корректировку режимов работы оборудования. Благодаря этому обеспечивается не только стабилизация процессов, но и их непрерывное улучшение.

Дополняет архитектуру модуль оценки рабочих характеристик, предназначенный для мониторинга эффективности системы в целом. Он реализует методы системной идентификации, вероятностного анализа и статистической обработки сигналов. Основной его функцией является диагностика и верификация корректности работы модулей управления и оптимизации. При необходимости модуль инициирует корректирующие действия, направленные на восстановление или улучшение рабочих параметров системы.

Следует подчеркнуть, что каждый из компонентов СУУ ТП-О-системы не функционирует изолированно, а интегрирован в единую структуру, обеспечивающую согласованное функционирование и адаптивное управление. Такая модульно-иерархическая организация позволяет оперативно реагировать на изменения внешней среды, оптимизировать переработку сырья и снижать производственные издержки.

Исследование [98] посвящено разработке автоматической системы управления процессом промывки красного шлама с использованием адаптивной модели. В рамках работы была создана система, включающая программно-управляемый датчик для мониторинга плотности осветленного раствора и массы осадка. Применение адаптивной модели позволило учесть нелинейную динамику процесса, что особенно важно для сложных промышленных условий. Авторы продемонстрировали, что внедрение системы позволило сократить затраты на реагенты на 10–15%, улучшив экономическую эффективность процесса. Исследование также подчеркивает необходимость разработки более точных и долговечных датчиков для условий агрессивной среды.

В исследовании [91] описан опыт специалистов, разработавших интеллектуальную систему управления процессами отстаивания и промывки КШ, возникающего при производстве глинозема. Разработанная система позволяет контролировать параметры функционирования сгустителя в режиме реального времени, применяя методы интеллектуальной обработки данных, оптимизацию управляющих алгоритмов и другие подходы автоматизации. Выявлено, что начальная концентрация соды и количество вводимого флокулянта значительно воздействуют на себестоимость получаемого продукта. Разработка, внедрение и опытная эксплуатация данной системы проводились на одном из глинозёмных заводов Китая в течение приблизительно двух лет. Испытания подтвердили её эффективность: удалось снизить расход флокулянта на 15%, а также уменьшить концентрацию сбрасываемой соды на 16–36%, что обеспечило значимый положительный экономический эффект и повысило стабильность технологического процесса.

На производстве используется программное обеспечение SysCAD для моделирования технологического процесса участка промывки красного шлама (таблица 1.2). SysCAD является мощным инструментом для статического и динамического моделирования технологических процессов, позволяя инженерам создавать детальные модели производственных операций, анализировать различные сценарии и оптимизировать процессы на стадии проектирования или модернизации. Однако интеграция прогнозной модели в SCADA-систему предоставляет ряд существенных преимуществ по сравнению с использованием SysCAD. SysCAD не интегрировано в контур СУ и не подходит для прогнозирования краткосрочных изменений или предиктивного управления в реальном времени, что обусловлено его изначальным назначением для стационарного анализа. Модель противоточной промывки в SysCAD используется для определения влияния количества ступеней промывки или для определения соотношения поданной в систему аппаратов промывной воды.

В основе математического описания в SysCAD для исследования участка промывки лежит уравнение материального баланса со следующими допущениями: не происходит выщелачивания материала из твердых частиц, вся твердая фракция выводится из-под конусов промывателей, расход пульпы из-под промывателей равен расходу шлама, поступающего в систему противоточной промывки, расход промывной воды равен расходу переливов промывателей, не учитывается добавление дополнительных потоков (например, флокулянта).

Таблица 1.2. Сравнительная таблица использования прогнозной модели и SysCAD

SysCAD	Прогнозная модель
Работа в режиме реального времени	
Обычно используется для офлайн-моделирования и анализа процессов. Модели в SysCAD часто основаны на среднестатистических данных и не учитывают текущие изменения в реальном времени	Обеспечивает онлайн-мониторинг и управление процессом в реальном времени. Он получает данные непосредственно от датчиков и оборудования, позволяя оперативно реагировать на изменения технологических параметров и внешних возмущений.
Прогнозирование и предиктивное управление	
Хотя может выполнять динамическое моделирование, обычно не используется для прогнозирования краткосрочных изменений в процессе или для предиктивного управления в реальном времени.	Использует прогнозную модель для расчета будущего состояния системы на основе текущих данных. Это позволяет оптимизировать управляющие воздействия, предвосхищать возможные проблемы и принимать превентивные меры.

Продолжение таблицы 1.2

SysCAD	Прогнозная модель
Интеграция с системой управления	
Является отдельным программным обеспечением, не всегда тесно интегрированным с системой управления производством. Требуется дополнительное время и ресурсов для передачи результатов моделирования в операционные решения.	Интегрирован непосредственно в SCADA-систему, обеспечивая мгновенное взаимодействие с контроллерами, исполнительными механизмами и человеко-машинным интерфейсом. Это обеспечивает бесшовную связь между моделированием и управлением.
Оперативная оптимизация ресурсоиспользования	
Оптимизация процессов проводится в офлайн-режиме и требует последующего внедрения результатов в производственный процесс.	Позволяет в реальном времени оптимизировать расход флокулянта, воды и энергоресурсов, непосредственно влияя на снижение эксплуатационных затрат и повышение эффективности производства.
Реакция на нештатные ситуации	
Не предназначен для оперативного обнаружения и реагирования на аварийные ситуации или отклонения в процессе.	Благодаря интеграции с SCADA-системой может быстро обнаруживать отклонения, генерировать предупреждения и предлагать решения для предотвращения аварий и простоев оборудования.
Единая платформа для управления и анализа	
Является отдельным инструментом, данные из которого нужно интегрировать с другими системами для полного анализа.	Работает в рамках единой SCADA-системы, объединяя данные моделирования, управления и мониторинга, что упрощает анализ и принятие решений.
Сокращение человеческого фактора	
Результаты моделирования должны быть интерпретированы и внедрены человеком, что может привести к задержкам и ошибкам.	Автоматически преобразует результаты модели в управляющие воздействия или рекомендации, минимизируя влияние человеческого фактора и повышая надежность управления.

1.8.1 Применение прогнозной модели в СУУ ТП противоточной промывки КШ

Одним из ключевых аспектов СУУ ТП является использование математических моделей для описания и прогнозирования поведения системы, а также внедрение онлайн-оптимизации, позволяющей динамически корректировать параметры процесса в реальном времени. Также СУУ ТП обеспечивает компенсацию возмущений, позволяя системе быстро адаптироваться к внешним и внутренним изменениям.

Прогнозирующее управление (Model Predictive Control, MPC) является одним из ключевых методов, используемых в усовершенствованных системах управления технологическими процессами (СУУ ТП). Этот подход опирается на использование математических моделей для прогнозирования будущего поведения системы и выбора оптимальных управляющих воздействий. MPC находит широкое применение в различных отраслях, включая химию, энергетику и производство.

Статья [76] представляет собой исчерпывающее исследование применения технологии прогнозирующего управления (Model Predictive Control, MPC) в промышленности. Авторы детально рассматривают эволюцию методов MPC, начиная с 1970-х годов, когда эта концепция только начинала применяться, и вплоть до её широкого распространения в начале 2000-х годов. Авторы отмечают, что успех MPC в этих областях обусловлен его адаптивностью, которая позволяет настраивать систему управления в реальном времени в зависимости от изменений в процессах и окружающих условиях.

Авторы также подчеркивают ограничения и вызовы, с которыми сталкиваются компании при внедрении MPC. К ним относятся сложности разработки математических моделей для сложных процессов, высокие вычислительные затраты, а также необходимость в высококвалифицированных специалистах для настройки и сопровождения таких систем. Кроме того, в статье анализируется тенденция к интеграции MPC с другими усовершенствованными методами управления, такими как нейронные сети и системы управления на основе нечёткой логики. Эти гибридные подходы, по мнению авторов, представляют собой следующий этап эволюции промышленного управления.

Статья [39] посвящена детальному рассмотрению методов СУУ ТП (Advanced Process Control, APC) и их применению в различных отраслях. Авторы подчёркивают, что APC представляет собой важный шаг вперёд по сравнению с традиционными системами управления, такими как PID-регуляторы, и позволяет оптимизировать сложные многомерные процессы, учитывать ограничения и эффективно реагировать на изменения в рабочих условиях. Авторы иллюстрируют применение СУУ ТП на примерах из различных отраслей. В нефтехимии этот метод используется для оптимизации работы ректификационных колонн и реакторов. В энергетике СУУ ТП находит применение в управлении турбинами и котлами для повышения их

эффективности. В химической промышленности СУУ ТП помогает улучшить выход целевых продуктов и обеспечить стабильность сложных реакций.

Несмотря на многочисленные преимущества, СУУ ТП сталкивается с рядом вызовов. Авторы отмечают сложности в создании точных моделей сложных процессов, высокие вычислительные требования для реализации онлайн-оптимизации и необходимость наличия квалифицированного персонала для внедрения и обслуживания таких систем.

1.8.2 Применение мягкого датчика в СУУ ТП противоточной промывки КШ

В СУУ ТП точный и своевременный контроль параметров является критически важным для обеспечения эффективности и безопасности производственных операций. Однако не все параметры могут быть измерены напрямую из-за технических или экономических ограничений. В таких случаях на помощь приходят программно-управляемый датчик также известные как виртуальные датчики, которые позволяют оценивать трудноизмеримые переменные на основе доступных данных и математических моделей.

На основе ГОСТ Р ИСО 15746-1:2016 [15], интеграция мягких датчиков позволяет:

1. Усовершенствовать управление процессами за счёт улучшения точности измерений и прогнозирования.
2. Ускорить реакцию на изменения в технологическом процессе благодаря автоматическому пересчёту параметров в режиме реального времени.
3. Минимизировать потери продуктов благодаря точной настройке управляющих воздействий.

Основные характеристики программно-управляемых датчиков включают их высокую настраиваемость, возможность интеграции с системами прогнозирующего управления, локальную обработку данных и поддержку подключения к промышленным сетям. Программно-управляемые датчики способны изменять частоту измерений, диапазон, точность и другие параметры в зависимости от требований процесса. Кроме того, они позволяют выполнять предварительную обработку данных, снижая нагрузку на центральную систему управления, а также поддерживают стандартные протоколы для интеграции с системами верхнего уровня, такими как SCADA или MES.

Стандартная СУ промывателя не включает следующие параметры: граница раздела фаз между зоной свободного осаждения и сливом осветленного алюминатного раствора, граница раздела фаз между зоной свободного осаждения и зоной стеснённого осаждения и средневзвешенный диаметр флокулированных частиц. Как указывалось ранее в питающем стакане проходит одно из главнейших процессов для осаждения – флокуляция или укрупнение частиц под действием реагента. Среди существующих лабораторных методов исследования и

полевых приборов для определения гранулометрического состава нет тех, которые подходили бы для определения параметров гранулометрического состава вещества в питающем стакане аппарата сгущения. Лабораторные методы исследования не подходят из-за необходимости отбора пробы из питающего стакана, что приводит к распаду сфлуккулированных частиц, а существующие полевые приборы, например установка для непрерывного автоматического измерения крупности частиц в потоке пульпы «ПИК-074П», щуп которого устанавливается непосредственно в рабочую среду, будет нарушать ход процесса флокуляции. При установке подобных датчиков и подвода воздуха на щуп и внутреннюю стенку питающего стакана будет нарушена целостность аппарата и соответственно ход процесса флокуляции пульпы. Исследование процесса флокуляции затруднено в связи с неопределенностью протекающего процесса и неточностью полученной информации в ходе отбора лабораторных проб [50; 51; 77].

Также необходимо учитывать, что датчик может быть выведен из строя при повреждении корпуса во время установки или использования. Проблема определения средневзвешенного диаметра частиц на выходе из стакана в динамическом режиме остается нерешенной. Распределение агрегированной пульпы по размерам на выходе из-под питающего стакана в настоящий момент не может быть измерено напрямую, но есть возможность их косвенного расчета для внедрения полученных выходных значений в существующее управление для повышения энергоэффективности.

Одним из перспективных направлений автоматизации в СУУ ТП является использование мягких датчиков, которые позволяют непрямым способом оценивать ключевые параметры технологического процесса. Например, в системе промывки шламов мягкие датчики могут применяться для мониторинга концентрации твёрдой фазы из-под конуса промывателя, размера флуккулированных частиц, степени осветления жидкости [32; 47; 67].

Программно-управляемые датчики представляют собой инновационное решение, основанное на анализе данных, полученных от физических датчиков, и применении математических моделей. Эти технологии обладают рядом преимуществ, включая оперативное выявление отклонений в процессе, таких как изменение концентрации твёрдой фазы в шламе, снижение затрат на оборудование за счёт замены сложных и дорогостоящих измерительных приборов алгоритмическими решениями, а также повышение точности управления благодаря интеграции в контуры автоматизации. Например, в управлении питающим стаканом сгустителя виртуальные датчики способны прогнозировать разрушение флоккул под воздействием турбулентности и корректировать скорость подачи флокулянта, способствуя стабилизации технологического процесса.

Применение программно-управляемых датчиков охватывает множество отраслей промышленности. В химической и нефтехимической промышленности они используются для

прогнозирования концентраций компонентов в реакторах или колоннах ректификации, мониторинга температуры и давления в труднодоступных зонах оборудования, а также расчёта степени превращения в каталитических процессах. В металлургии и гидрометаллургии такие датчики находят применение при оценке концентрации полезного компонента в рудах и растворах [52; 53], а также при контроле параметров осаждения и сгущения шламов, где физические датчики часто подвержены загрязнению. В энергетике виртуальные датчики позволяют прогнозировать температуру парового потока на основе параметров сгорания топлива и мониторить выбросы CO_2 и других газов, которые сложно измерять напрямую. В очистке сточных вод они используются для расчёта концентрации загрязняющих веществ в потоках на основе косвенных показателей, таких как pH или проводимость.

Несмотря на значительные преимущества, существуют определённые ограничения, которые необходимо учитывать при разработке и внедрении программно-управляемых датчиков. Одной из ключевых проблем является качество данных: неполный или шумный набор данных может привести к снижению точности прогноза. Кроме того, избыточная сложность математических моделей увеличивает вычислительные затраты и затрудняет использование таких датчиков в реальном времени. Также для обеспечения точности прогнозов требуется периодическое обновление моделей с учётом изменений в характеристиках процессов. Успешное преодоление этих ограничений делает программно-управляемые датчики важным инструментом в модернизации систем автоматизации и управления технологическими процессами.

В статье [99] представлены основные концепции разработки программно-управляемых датчиков для промышленной автоматизации. Авторы подчеркивают, что программно-управляемые датчики используют методы машинного обучения и статистического анализа для оценки недоступных переменных. Особое внимание уделяется проблеме очистки данных, поскольку качество информации с физических датчиков критически важно для построения моделей. На примере нефтехимической промышленности статья описывает, как программно-управляемые датчики помогают оценивать концентрации компонентов в реакторах и степень превращения в химических процессах. Одним из ключевых выводов является необходимость постоянного обновления моделей для учёта изменений в процессе.

Исследование [105] фокусируется на применении программно-управляемых датчиков в металлургии. В работе описываются методы оценки концентрации полезных компонентов в растворах при выщелачивании руд. Авторы отмечают, что физические датчики часто подвержены загрязнению, а виртуальные датчики обеспечивают стабильность мониторинга. Кроме того, приводится пример применения нейронных сетей для прогнозирования осаждения шламов в гидрометаллургических процессах. Эксперименты показали, что программно-

управляемые датчики могут достигать точности измерений до 95%, что делает их надёжным инструментом для управления технологическими процессами.

В публикации [39] обсуждаются возможности использования программно-управляемых датчиков для управления энергетическими системами. Авторы описывают подходы к прогнозированию температуры парового потока и концентрации выбросов CO_2 , основанные на анализе данных о сгорании топлива. Исследование подчеркивает, что внедрение программно-управляемых датчиков снижает эксплуатационные затраты за счёт сокращения необходимости в дорогостоящем физическом оборудовании. Также авторы акцентируют внимание на интеграции датчиков в СУ, что позволяет в реальном времени корректировать параметры для повышения энергоэффективности.

В статье [100] рассматривается использование программно-управляемых датчики для контроля процессов очистки сточных вод. Авторы отмечают, что традиционные методы измерения загрязняющих веществ требуют сложного оборудования и значительных затрат. Применение виртуальных датчиков позволяет прогнозировать концентрацию веществ на основе таких косвенных параметров, как pH и проводимость. В исследовании демонстрируется, что точность прогнозирования с использованием регрессионных моделей достигает 92%, что достаточно для принятия управленческих решений. Также описываются примеры интеграции программно-управляемых датчики в СУ для автоматической корректировки подачи реагентов.

Анализ литературы показывает, что программно-управляемые датчики широко применяются в различных отраслях промышленности, включая нефтехимию, металлургию, энергетику и очистку сточных вод. Основное преимущество виртуальных датчиков заключается в возможности оценки труднодоступных параметров без значительных затрат на физическое оборудование. Однако для успешного внедрения требуется учитывать несколько факторов: качество исходных данных, выбор математической модели и необходимость регулярного обновления алгоритмов.

Выводы к главе 1

В первой главе диссертации проведен всесторонний анализ современного состояния процесса противоточной промывки красного шлама в глиноземном производстве, рассмотрены теоретические основы процессов разделения твердой и жидкой фаз, а также исследованы существующие системы управления этим технологическим процессом.

Процесс противоточной промывки красного шлама играет ключевую роль в технологии Байера, обеспечивая эффективное разделение твёрдой и жидкой фаз. Однако его управление связано с рядом серьёзных вызовов. Высокая инерционность и нелинейность технологического процесса, а также значительное влияние возмущающих факторов, таких как изменение

гранулометрического состава и расхода питающей пульпы, существенно затрудняют обеспечение стабильной работы системы.

Существующие подходы к управлению процессом зачастую основаны на полуавтоматических системах, которые не предусматривают оперативного контроля ключевых параметров, таких как соотношение жидкой и твёрдой фаз (Ж/Т) или средневзвешенный диаметр флоккул. Отсутствие современных решений приводит к ухудшению качества промывки, увеличению потерь ценных компонентов и росту экологических рисков, связанных с накоплением отходов на шламохранилищах.

Дополнительно, использование физических датчиков, таких как устройства для определения фазовых границ осаждения и концентраций твёрдых частиц, ограничено из-за высокой стоимости, сложности эксплуатации в агрессивных средах и риска их выхода из строя. Эти ограничения подчёркивают необходимость разработки программно-управляемых датчиков (мягких датчиков), способных рассчитывать неизмеряемые параметры, что открывает новые возможности для усовершенствованного управления.

Традиционные подходы к моделированию процессов противоточной промывки также имеют свои ограничения. Они недостаточно учитывают физико-химические свойства пульпы, кинетику флокуляции и распределение частиц, что снижает эффективность существующих систем управления. Это подчёркивает необходимость создания новых математических моделей, которые способны более точно описывать процесс и обеспечивать прогнозирование его ключевых параметров.

Таким образом, модернизация классической АСУ ТП и переход к СУУ ТП становятся необходимыми для решения обозначенных проблем. Эти изменения позволят снизить потери щелочи, уменьшить объём жидкой фазы, повысить стабильность работы оборудования и минимизировать экологическое воздействие. Создание и внедрение прогнозных математических моделей, а также АСУ нового поколения, обеспечат как экологическую устойчивость, так и экономическую эффективность процесса противоточной промывки.

В главе 1 были описаны различные конструкции питающих стаканов и их основные отличия. На исследуемом предприятии используется конструкция питающего стакана с встроенной полкой, разработанная для улучшения смешивания пульпы с флокулянт и обеспечения эффективной агрегации частиц. Это позволяет формировать флоккулы максимального размера на выходе из стакана. Исследования, выполненные компанией NATCH с использованием CFD-моделирования, показали, что конструкции без полки способствуют прямому перетоку питающего потока с коротким временем задержки и недостаточным перемешиванием. Такое явление негативно влияет на процесс флокуляции. Полка, расположенная ниже точки ввода питания, устраняет переток, способствует равномерному

распределению твёрдого вещества и флокулянта, что, в свою очередь, обеспечивает формирование крупных и устойчивых флокул. Моделирование процессов флокуляции и осаждения имеет важное значение как для гидрометаллургии, так и для обогащения полезных ископаемых. Разработка точных моделей позволяет сократить расход реагентов, потери ценных компонентов и повысить качество продукции. В гидрометаллургии это снижает потери алюминатного раствора, а в обогащении – улучшает качество концентрата и извлечение минералов, обеспечивая рациональное использование ресурсов.

2.2 Способы подачи флокулянта

Эффективность осаждения твердых частиц во многом зависит от метода подачи флокулянта к питающему потоку КШ. На исследуемом предприятии дозирование рабочего раствора флокулянта ведется согласно технологии в два приема. Первая добавка флокулянта к пульпе КШ производится в питающий трубопровод и контролирует чистоту слива. Вторая добавка флокулянта производится в питающий стакан аппарата и позволяет контролировать скорость осаждения и уплотнение шлама [52].

Существуют различные подходы подачи флокулянта, каждый из которых имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретных условий производства.

1. Подача флокулянта непосредственно в питающий стакан: флокулянт вводится непосредственно в питающий стакан, где происходит его смешение с пульпой, способствуя образованию флокул и последующему осаждению твердых частиц (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Дозирование флокулянта в питающий стакан. Материалы РУСАЛ Windalco

2. **Подача флокулянта перед питающим стаканом:** флокулянт добавляется в пульпу на этапе транспортировки пульпы в трубе. Это позволяет начать процесс флокуляции до входа в стакан, обеспечивая более крупные и стабильные флокулы к моменту осаждения.

3. **Дробная (многоступенчатая) подача флокулянта:** флокулянт вводится в пульпу в нескольких точках по ходу технологического процесса. Такой метод позволяет более равномерно распределить флокулянт и улучшить процесс флокуляции (рисунок 2.3).

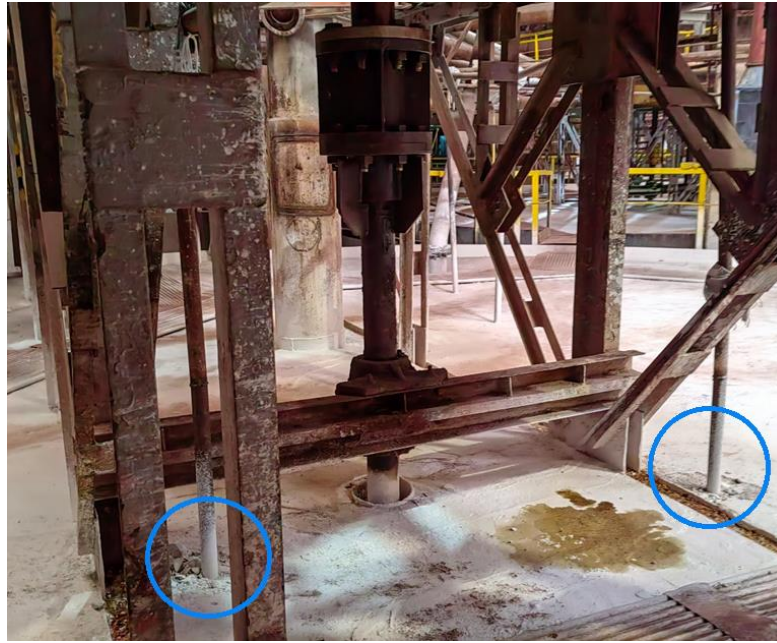


Рисунок 2.3 – Дозирование флокулянта в двух точках питающего стакана. Материалы по результатам производственной стажировки

4. **Подача флокулянта на шламовое поле:** прямое добавление флокулянта на шламовое поле не является стандартной практикой, однако это может влиять на чистоту подшламовой воды, возвращаемой в процесс промывки в качестве вспомогательного потока.

2.3 Математические модели и уравнения укрупнения частиц

Агрегация частиц, т.е. процесс укрупнения, представляет собой механизмы соединения мелкодисперсных частиц в более крупные. Данный процесс протекает под воздействием различных факторов, включая физико-химические свойства среды, концентрацию частиц и внешние воздействия. Для анализа и описания агрегации используются математические модели и уравнения, учитывающие кинетические аспекты взаимодействия частиц и условия окружающей среды.

1. Уравнение Смолуховского

Уравнение коагуляции Смолуховского (1917) было одним из первых, используемых для описания процесса укрупнения частиц (2.1).

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} K_{j,i-j} n_j n_{i-j} - n_i \sum_{j=1}^{\infty} K_{i,j} n_j, \quad (2.1)$$

где n_i – концентрация частиц i (или количества частиц данного размера), кол-во частиц/м³,

n_{i-j} – концентрация частиц размера $i-j$, кол-во частиц/м³,

t – время, с,

$K_{j,i-j}$ – коэффициент коагуляции между частицами размеров j и $i-j$ (он определяет скорость, с которой частицы разных размеров сливаются в более крупные агрегаты).

Индекс $i-j$ в формуле (2.1) относится к размеру частиц, который получается, как разница между текущим размером i и другим размером j , участвующим в слиянии.

Концентрация частиц i (или количества частиц данного размера) рассчитывается как (2.2):

$$n_i = n_0 \frac{(t/\tau')}{(1+t/\tau')^{i+1}}, \quad (2.2)$$

где τ' – период коагуляции (время, за которое начальное число частиц уменьшается вдвое), с,

n_0 – начальная концентрация частиц.

Рассчитывается период коагуляции по формуле (2.3):

$$\tau' = \frac{6\eta}{8kTn_0}, \quad (2.3)$$

где η – динамическая вязкость жидкости, Па·с,

k – постоянная Больцмана, Дж/К,

T – температура системы, К.

Первая сумма в уравнении (2.1) описывает образование частиц размера i в результате слияния частиц i и $i-j$. Второй член описывает переход частиц размера i из популяции, поскольку они объединяются с другими частицами. Это уравнение позволяет описывать процесс слияния частиц, однако в своем изначальном виде оно не учитывает такие процессы, как разрушение флокулов или влияние турбулентности на взаимодействие частиц.

2. Теория медленной коагуляции Фукса

Модель Фукса была разработана для описания коагуляции частиц в коллоидных системах, с учетом факторов, влияющих на вероятность столкновения частиц. Основной фокус модели – учет межчастичных взаимодействий, таких как силы Ван-дер-Ваальса и электростатическое отталкивание. Эта модель основана на теории диффузионного сближения частиц. Скорость коагуляции K в модели Фукса зависит от вероятности столкновения частиц и их взаимодействия (2.4):

$$K = \frac{4\pi(R_1+R_2)D_{12}}{S}, \quad (2.4)$$

где R_1, R_2 – радиусы частиц, м.

D_{12} – коэффициент относительной диффузии частиц, м²/с,

S – коррекционный фактор, зависящий от межчастичных сил.

Модель Фукса хорошо подходит для описания коагуляции в коллоидных системах, где межчастичные взаимодействия играют ключевую роль. Она дополняет модель Смолуховского, добавляя учет электростатических и Ван-дер-Ваальсовых сил. Однако для более сложных систем, включающих разрушение частиц или турбулентные потоки, модель популяционного баланса остается более универсальной [49].

3. Модель Лифшица–Слэзова–Вагнера (Lifshitz–Slyozov–Wagner)

Распределение Лифшица–Слэзова–Вагнера по размерам частиц описывает рост частиц в результате Оствальдового созревания – процесса, при котором более мелкие частицы растворяются, а более крупные растут, за счет разности химического потенциала. Основное уравнение этой модели описывает изменение радиуса частицы во времени (2.5) [61]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D\gamma}{RT} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (2.5)$$

где r – радиус частицы, м,

r_0 – критический радиус частицы, при котором рост частицы становится энергетически стабильным, м,

D – коэффициент диффузии, м²/с,

t – время, с,

γ – поверхностное натяжение, Н/м,

R – универсальная газовая составляющая, Дж/(моль·К),

T – температура, К.

Модель LSW используется для описания роста частиц в гетерогенных системах, где растворение и повторное осаждение играют важную роль.

4. Модель агломерации Фридлендера (Friedlander Aggregation Model)

Модель Фридлендера – это еще одна модель, которая может использоваться для описания агломерации частиц. Она применима для описания процессов укрупнения в аэрозолях и рассматривает взаимодействие между частицами, движущимися в газовой фазе (2.6):

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = & \frac{1}{2} \int_0^v K(v', v - v') n(v', t) n(v - v', t) dv' \\ & - n(v, t) \int_0^\infty K(v, v') n(v', t) dv', \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $n(v, t)$ – распределение частиц по объемам в момент времени t , 1/м⁶,

$K(v', v - v')$ – ядро коагуляции, которое зависит от свойств взаимодействующих частиц, м³/с,

t – время, с,

v, v' – объемы частиц, м³.

Модель (2.6) аналогична уравнению Смолуховского (2.1), но адаптирована для процессов в аэрозолях, где учитываются особенности взаимодействия частиц в газовой фазе.

5. Уравнения Флокуляции с использованием кинетической теории газа

В системах с жидкостями, где укрупнение частиц происходит благодаря случайным столкновениям, можно использовать модифицированное уравнение кинетической теории газа для описания скорости агломерации. Эти уравнения основаны на расчетах вероятности столкновения частиц и могут быть выражены следующим образом (2.7):

$$J = \beta n_1 n_2, \quad (2.7)$$

где J – скорость агломерации (количество столкновений частиц, приводящих к образованию агрегатов, в единицу времени), $1/(m^3 \cdot c)$,

β – коэффициент столкновений, который зависит от размера частиц, концентрации и вязкости среды, m^3/c ,

$n_1 n_2$ – концентрация сталкивающихся частиц, $1/m^3$.

6. Модель распределенной агломерации с использованием марковских цепей (Markov Chain Framework)

Модели на основе марковских цепей также могут быть использованы для описания укрупнения частиц. В этой модели система рассматривается как множество состояний, и процесс агломерации описывается переходом между этими состояниями. Основное уравнение (2.8) представляет собой матричное уравнение, описывающее вероятность переходов:

$$\frac{dP(t)}{dt} = P(t)A, \quad (2.8)$$

где $P(t)$ – вектор вероятностей нахождения в различных состояниях,

A – матрица переходов, которая описывает вероятность укрупнения и разрушения частиц.

7. Модель Попова–Когана

Модель Попова–Когана (2.9) применяется для описания агломерации частиц в турбулентных потоках и учитывает влияние турбулентных пульсаций на столкновение частиц. Эта модель также основывается на балансе популяции частиц и может быть описана следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dn}{dt} = -k_{ag}n^2 + k_{break}n \quad (2.9)$$

где k_{ag} – коэффициент агломерации, зависящий от турбулентности, $1/c$,

k_{break} – коэффициент разрушения агрегатов, $1/c$,

n – концентрация частиц, $1/m^3$.

Эта модель хорошо подходит для условий интенсивного перемешивания, где турбулентность оказывает значительное влияние на взаимодействие частиц. Анализ существующих моделей, описывающий процесс агрегации представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сводная таблица моделей для описания процессов агрегации

Модель	Преимущества	Недостатки
Уравнение Смолуховского	Простота, подходит для базового анализа процесса коагуляции	Не учитывает разрушение частиц, рост флоккул, влияние турбулентности
Теория Фукса	Учитывает межчастичные взаимодействия и диффузионные процессы	Применима только для коллоидных систем с низкой концентрацией частиц (менее 10 г/л), ограничена турбулентностью
Модель Лифшица–Слёзова–Вагнера	Подходит для описания роста частиц через растворение	Неприменима для агрегации, разрушения частиц и в динамических условиях
Модель агрегации Фридлендера	Эффективна для аэрозольных систем	Ограниченно применима для жидких сред, не учитывает разрушение частиц
Уравнения кинетической теории газа	Учитывают столкновения частиц в жидких средах	Не учитывают разрушение, рост частиц и турбулентность
Модели на основе марковских цепей	Подходят для моделирования случайных процессов	Меньшая точность в описании кинетики агрегации
Модель Попова–Когана	Подходит для турбулентных потоков	Высокая сложность численных решений
Модель популяционного баланса (МПБ)	Универсальна, учитывает агрегацию, разрушение, рост и турбулентные потоки	Требует больших вычислительных ресурсов и калибровки

Модель популяционного баланса выгодно отличается от других благодаря своей гибкости и широкому спектру применения. В отличие от уравнения Смолуховского и модели Фукса, МПБ учитывает разрушение и рост частиц, что особенно важно для процессов с высокой турбулентностью. Она превосходит модель Лифшица–Слёзова–Вагнера в условиях интенсивной агрегации, а также применима к жидким средам, где модель Фридлендера оказывается бесполезной.

Её использование в рамках данной работы позволяет не только описать динамику агрегации и дефлокуляции частиц, но и прогнозировать изменения распределения частиц по размерам в промышленных системах. В частности, одним из ключевых подходов является модифицированная модель популяционного баланса, разработанная Хаунслоу (1988) и

Спайсером (1996), которая оптимизирует расчет распределения частиц по размерам за счет применения системы упрощенной дискретизации и учета параметров турбулентности. Эта модель особенно подходит для систем, где размерные интервалы частиц значительно варьируются, и применяется для оценки процессов флокуляции и коагуляции в промышленных условиях. RBM может включать в себя элементы из всех вышеперечисленных моделей.

2.4 Математическое описание модели популяционного баланса

Модель баланса популяции (МПБ, RBM) широко применяется для моделирования процессов агрегации частиц, коагуляции и флокуляции. Зарубежные и российские исследователи используют МПБ для исследования агрегации частиц коагулянтами и повышения эффективности процесса флокуляции. МПБ представляет собой уравнение переноса, описывающее функцию плотности числа частиц, которая зависит от времени, пространственного расположения и внутренних параметров, таких как объем, площадь поверхности или химический состав. Процессы флокуляции (агрегации) частиц, а также распада флокул при достижении предельного размера (дефлокуляции) описываются распределением частиц по размерам (Particle size distribution – PSD). Рост и распад флокул моделируются с использованием системы дифференциальных уравнений [83].

МПБ использует уравнение Смолуховского как основу для описания агломерации частиц в процессе коагуляции или флокуляции. В МПБ учитываются такие процессы, как агломерация, разрушение, рост и изменения в размерах частиц, и модель строится с использованием подхода, предложенного Смолуховским, для описания динамики популяции частиц. Уравнение Смолуховского фактически является частным случаем более общей модели популяционного баланса, которая описывает, как частицы взаимодействуют друг с другом и как это влияет на изменение распределения по размерам частиц в системе.

МПБ требует исходного распределения частиц сырья по размерам в качестве начальной точки моделирования. Однако в большинстве случаев экспериментальное распределение частиц по размерам не может быть использовано напрямую, так как баланс популяций имеет свое собственное определенное расстояние между каналами. Этот интервал более грубый (меньше каналов), чем задается большинством современных приборов для определения размеров частиц, и в этом случае начальное распределение баланса крупности можно получить путем интерполяции. В настоящее время в алгоритме используется линейная интерполяция. Если экспериментальное распределение по размерам содержит всего несколько точек данных (например, данные ситового анализа) или распределение сильно зашумлено, то сначала можно подогнать распределение по размерам под сглаженное. Затем сглаженное распределение

используется для интерполяции к исходному распределению баланса популяции. Для подгонки распределения используется логнормальная функция (2.10):

$$P_i = \frac{k}{\ln(var)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x_i) - \ln(\bar{x})}{\ln(var)} \right]^2}, \quad (2.10)$$

где P_i – процентная масса (или объем) частиц в i -м диапазоне размеров, объемные доли %,

k – константа,

var – эквивалент дисперсии,

x_i – средний размер i -го диапазона размеров, мкм,

$\bar{x}$ – средневзвешенное по объему значение всех частиц, мкм.

Логнормальные распределения подгоняются под экспериментальные данные с помощью симплекс-оптимизации по одной из четырех возможных целевых функций. При подгонке к колоколообразному распределению функция имеет вид (2.11):

$$\min_{k, \bar{x}, var} \Psi = \sum_i (P_i - P_{i,exp})^2, \quad (2.11)$$

где $\min_{k, \bar{x}, var} \Psi$ – минимизируемая объективная функция, объемные доли %,

P_i – процентная масса (или объем) частиц в i -м диапазоне размеров, объемные доли %,

$P_{i,exp}$ – экспериментальное значение P_i .

Распределения частиц по размерам обычно сильно асимметричны, с длинным хвостом, уходящим вправо к большим размерам. Поэтому на графике они обычно изображаются с логарифмической осью x и диапазонами размеров, ширина которых постепенно увеличивается в соответствии с числовой прогрессией. Таким образом, распределение выглядит более симметричным, и часто распределения частиц по размерам описываются логнормальным распределением. Кроме того, распределение по размерам может быть построено с указанием количества частиц или даже площади поверхности на оси y , однако чаще всего строится график процентного содержания по массе в каждом диапазоне размеров. Это позволяет учесть тот факт, что только несколько крупных частиц могут составлять основную массу образца [18].

При выборе кумулятивного распределения целевая функция имеет вид (2.12):

$$\min_{k, \bar{x}, var} \Psi = \sum_i (\gamma_i - \gamma_{i,exp})^2, \quad (2.12)$$

где γ_i – кумулятивный процент по размеру i .

Такая формулировка взвешивает объективную функцию в сторону каналов большего размера по сравнению с колоколообразным распределением.

Распределение частиц по размерам строится в виде кумулятивных распределений или распределений в форме «колокола». В колоколообразном распределении на оси x откладывается размер частиц, а на оси y – их количество, массовая доля или процентное содержание частиц в каждом диапазоне размеров. Этот график представляет собой гистограмму (вертикальную

столбчатую диаграмму), однако в центре каждого размерного канала обычно ставится точка, и точки объединяются для получения плавного колоколообразного распределения. Этот тип графика позволяет легче увидеть форму распределения частиц, долю мелких фракций и т.д.

Кумулятивное распределение же строится как процент прохождения в зависимости от размера частиц, при этом используется верхний размер каждого размерного канала, а не центральный.

Модель баланса популяций решается численно как задача с начальным значением и разворачивается во времени. Начальной точкой моделирования является гранулометрический состав сырья, над начальным распределением добавляется ряд дополнительных каналов большего размера (пустых значений). В эти каналы частицы будут мигрировать вверх в процессе флокуляции [16; 59].

Каждый из размерных каналов описывается ОДУ. Изначально в каждом канале может присутствовать определённое число частиц либо их отсутствие, в зависимости от начального распределения. После введения флокулянта начинается процесс образования крупных агрегатов: частицы исчезают из мелких каналов и появляются в виде укрупнённых структур в более крупных. Скорость потери или набора частиц из каждого канала определяется ядрами агрегации и разрушения, где ядро – это, по сути, уравнение скорости, зависящее от размера. Моделирование решается численно путем выполнения серии малых шагов по времени и отслеживания количества частиц в каждом канале по мере продвижения модели во времени.

Поскольку агрегаты также могут разрушаться, необходимо ввести два дополнительных члена для учета потерь и прироста в результате разрушения. Второй член уравнения справа 5 описывает скорость потери частиц размера k в результате разрушения, а последний член описывает прирост в результате разрушения более крупных агрегатов, часть из которых даст дочерние фрагменты, попадающие в диапазон размеров k . (2.13)

$$\frac{dN_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1, i+j=k}^{k-1} \alpha \beta_{ij} N_i N_j - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha \beta_{ik} N_i N_k - S_k N_k + \sum_{l=k+1}^{\infty} \Gamma_{lk} S_l N_l, \quad (2.13)$$

где N_i – количество частиц i -го размера, м^{-3} ,

t – время, с,

α – коэффициент эффективности работы флокулянта $[0,1]$,

β_{ij} – скорость столкновения между частицами i и j размера (ядро агрегации), $\text{м}^3/\text{с}$,

S_k – скорость разрушения (ядра) частицы размера k , с^{-1} ,

Γ_{lk} – функция распределения разрушения (количество частиц размера k , образующихся при разрушении частицы размера l).

Уравнения (2.12) и (2.13) справедливы только в том случае, если расстояние между каналами имеет постоянную ширину. Типовой вид распределения частиц по размерам в логарифмическом масштабе. Логарифмический интервал позволяет сделать асимметричное распределение частиц более симметричным, он имеет ряд дополнительных преимуществ для моделирования баланса популяций. Такое распределение уменьшает общее число уравнений, которые необходимо решить (что ускоряет процесс моделирования), сохраняя при этом тонкое разрешение на мелких частицах.

Для описания агрегации частиц в условиях турбулентных потоков, характерных для питающих стаканов в промывателях, используется уравнение (2.14), предложенное Хаунслоу и Спайсером. Она учитывает такие параметры, как эффективность столкновений, скорость разрушения флоккул и фрактальную размерность агрегатов, что делает её удобным инструментом для расчета флокуляции в промышленных системах.

$$\begin{aligned} \frac{dN_k}{dt} = & \sum_{j=1}^{i-2} 2^{j-i+1} \beta_{i-1,j} N_{i-1} N_j + \frac{1}{2} \beta_{i-1,i-1} N_{i-1}^2 - N_i \sum_{j=1}^{i-1} 2^{j-i} \beta_{i,j} N_j \\ & - N_i \sum_{j=i}^{\infty} \beta_{i,j} N_j - S_i N_i + \sum_{j=i}^{\infty} \Gamma_{i,j} S_j N_j \end{aligned} \quad (2.14)$$

Эта формула баланса популяций имеет относительно грубую дискретизацию (2.15):

$$\frac{V_{i+1}}{V_i} = 2 \text{ или } \frac{L_{i+1}}{L_i} = \sqrt[3]{2} \quad (2.15)$$

где V_i – объем $i_{го}$ канала,

L_i – длина $i_{го}$ канала.

В МПБ (2.14) большое расстояние между рассчитываемыми каналами, что позволяет охватить весь диапазон размеров от мельчайших первичных частиц до крупных агрегатов в 40 размерных каналах. Размерный интервал модифицируется для учета пористости заполнителя. Уравнение (2.14) сформулировано для непористых частиц, т.е. для коалесценции капель, и этот размер сохраняется в модели для сохранения массы частиц. Однако для расчета радиусов столкновений и т.д. используется модифицированный размер (2.16):

$$d_{agg,i} = d_p K_p^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{d_{m,i}}{d_p} \right)^{\frac{3}{D_f}}, \quad (2.16)$$

где $d_{agg,i}$ – диаметр агрегата $i_{го}$ размера, м,

d_p – диаметр первичной частицы, м,

$d_{m,i}$ – массовый эффективный диаметр агрегата $i_{го}$ размера, м,

D_f – фрактальная размерность, безразмерная,

K_p – коэффициент формы частиц, безразмерный.

Ядра агрегации и разрушения описывают физику процесса флокуляции и являются наиболее важными уравнениями в модели. Как уже отмечалось, это уравнения скорости, описывающие скорости агрегации и разрушения, однако ядрами они называются потому, что являются функциями размера частиц. Ядро агрегации имеет вид (2.17):

$$\beta_{ij} = 1.294\alpha G(a_i + a_j)^3, \quad (2.17)$$

где: α – эффективность захвата $[0,1]$ (принимается за M),

G – средняя скорость турбулентного сдвига, с^{-1}),

a_i – радиус i -й частицы, м,

a_j – радиус j -й частицы, м.

Это ядро турбулентных столкновений Саффмана и Тернера (1956), которое является наиболее широко используемым и принятым ядром флокуляции для мелких частиц в турбулентных потоках промышленного масштаба. Эффективность захвата (α) также включается для учета того факта, что не все столкновения будут успешными.

Ядро разрушения имеет вид (2.18):

$$S_i = \frac{k_2 \varepsilon^{k_3} \mu a_{agg,j}}{\theta_f}, \quad (2.18)$$

где θ_f – эффективное покрытие поверхности флокулянта, кг/м^2 ,

μ – вязкость суспензии, Нс/м^2 ,

ε – скорость диссипации энергии на единицу массы, $\text{м}^2/\text{с}^3$ или Дж/с кг ,

k_2 – параметр модели,

k_3 – параметр модели.

В промывателе несколько основных и вспомогательных точек дозирования флокулянта: в питающий стакан, в трубу с питательной пульпой перед подачей в промыватель. В данной работе принимаются допущения, что агрегация частиц в стакане и трубе идет по одному закону. Далее все константы моделирования получены в опытах в трубе.

Для расчета ядра агрегации и разрушения требуется ряд дополнительных параметров. Эффективность захвата (α) в уравнении (2.17) определяется индексом смешивания (M) (2.19):

$$M = 1 - e^{-k_1 \sqrt{f} L/D}, \quad (2.19)$$

где: k_1 – параметр модели, безразмерный,

L – длина трубы после добавления флокулянта, м,

D – диаметр трубы, м,

f – коэффициент трения трубы, безразмерный.

Это уравнение описывает перемешивание в турбулентном потоке в трубе. До добавления флокулянта эффективность улавливания равна нулю (стабильная нефлокулированная суспензия). После добавления флокулянта происходит сложный процесс перемешивания

флокулянта со взвесью и адсорбции флокулянта на поверхности частиц. По мере адсорбции флокулянта на поверхности частиц эффективность захвата увеличивается и начинается процесс флокуляции [69].

Поскольку модель решается по времени, а не по длине трубы, уравнение (2.19) переводится во временную область через среднюю скорость потока в трубе (2.20):

$$M = 1 - e^{-k_1 \Omega}, \quad (2.20)$$

где для потока в трубе Ω определяется (2.21):

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\sqrt{f}V}{D}, \quad (2.21)$$

где V – средняя скорость потока в трубе, м/с,

Ω – дополнительное ОДУ, решаемое моделью.

Если выбрана либо постоянная скорость сдвига, либо постоянная скорость диссипации энергии, то данные по трубам не используются, уравнение сводится к (2.22):

$$\frac{d\Omega}{dt} = 1 \quad (2.22)$$

Ядро разрушения (2.18) содержит член θ_f – эффективное покрытие поверхности флокулянта, определяемое уравнением (2.23):

$$\theta_f = \frac{m_f}{A_s} M(1 - \theta) \quad (2.23)$$

где θ_f – эффективное покрытие поверхности флокулянта, кг/м²,

M – индекс смешивания, определяемый уравнением 11,

m_f – масса флокулянта, кг,

A_s – площадь поверхности твердого тела, м²,

θ – деградация флокулянта [0,1].

Концептуально это просто масса флокулянта на единицу поверхности частицы. Ядро разрушения обратно пропорционально покрытию флокулянтом, т.е. меньшее количество флокулянта дает более слабые агрегаты и, следовательно, увеличивает скорость разрушения, что приводит к уменьшению размера агрегатов. Зависимость дозировки флокулянта от площади поверхности означает, что более мелкие частицы сырья с большей площадью поверхности (на единицу массы частиц) являются более слабыми и, следовательно, дают более мелкие агрегаты, что соответствует экспериментальным наблюдениям [64; 70].

Эффективное покрытие также содержит индекс смешивания (M) для учета того факта, что флокулянт должен адсорбироваться на поверхности, чтобы оказать какое-либо воздействие. Однако это математически неудобно, так как до добавления флокулянта M равен нулю. Следовательно, эффективное покрытие также равно нулю, а ядро разрушения – либо «бесконечности», либо «ошибке, плавающему делителю нуля». Эта проблема решается двумя

способами. Во-первых, не допускается, чтобы M когда – либо было равно нулю, для этого в коде задается минимально малое число (1×10^{-10}). Это предотвращает плавающее деление нуля. Во-вторых, ядро разрушения отключается, когда средний размер агрегатов приближается к размеру первичных частиц. Это делается путем умножения на сглаженную ступенчатую функцию (2.24):

$$Z = 1 - e^{1 - \frac{\overline{d_{agg}}}{d_p}} \quad (2.24)$$

Это объясняет тот факт, что первичные частицы не разрушаются, по крайней мере, относительно агрегатов и в условиях, способствующих флокуляции. На другом конце процесса мягкое уменьшение размера агрегата при длительном сдвиге моделируется с помощью члена Θ , характеризующего деградацию флокулянта. Он учитывает расщепление и/или перегруппировку цепей флокулянта на поверхности частиц, в результате чего флокулянт становится менее эффективным, а агрегаты более склонными к разрушению. Деструкция флокулянта моделируется в виде дополнительного дифференциального уравнения (2.25):

$$\frac{d\Theta}{dt} = k_4 \varepsilon^{k_3} \mu \varphi_s M (1 - \Theta (\frac{\varphi_{eff}}{\varphi_s})^{\frac{1}{3}}) \quad (2.25)$$

Скорость сдвига (G) и диссипации энергии (ε) оказывают существенное влияние на большинство аспектов процесса флокуляции, увеличивая скорость перемешивания, скорость адсорбции, скорость агрегации и разрушения. Скорость сдвига определяется (2.26):

$$G = \sqrt{\frac{\varepsilon \rho_f}{\mu}}, \quad (2.26)$$

где G – скорость сдвига, c^{-1} ,

μ – вязкость суспензии, $Нс/м^2$,

ε – скорость диссипации энергии на единицу массы, $м^2/с^3$, или Дж/скг.

Для потока в трубе скорость диссипации энергии рассчитывается по обычным уравнениям (2.27) коэффициента трения в трубе:

$$\varepsilon = \frac{2fV^3}{D}, \quad (2.27)$$

где ε – скорость диссипации энергии, единицы измерения, $м^2/с^3$,

f – коэффициент трения, безразмерная величина.

V – скорость потока, $м/с$,

D – диаметр трубы, $м$.

Для турбулентного потока в гладких трубах коэффициент трения (f) определяется уравнением Блазиуса (2.28):

$$f = \frac{0.0791}{Re^{\frac{1}{4}}}, \quad (2.28)$$

где число Рейнольдса в трубе (2.29):

$$Re = \frac{DV\rho_f}{\mu} \quad (2.29)$$

Плотность жидкости (суспензии, шлама) рассчитывается из уравнения (2.30):

$$\rho_f = \rho_s\varphi + \rho_l(1 - \varphi), \quad (2.30)$$

где ρ_s – плотность твердого тела (частиц) (кг/м³),

ρ_l – плотность жидкости (кг/м³),

φ – объемная доля частиц (м³/м³ – безразмерная).

Вязкость суспензии увеличивается в зависимости от объемной доли частиц. Для непористых частиц (2.31):

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-k}, \quad (2.31)$$

где φ_m – максимальная доля твердых частиц, безразмерная,

k – вспомогательный коэффициент,

μ – вязкость суспензии, Нс/м²,

μ_0 – вязкость жидкости, Нс/м².

Однако флоккулы являются пористыми, причем пористость увеличивается с ростом их размера по отношению к первичным частицам, поэтому уравнение (2.31) приобретает вид (2.32):

$$\mu_s = \mu_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m} \left(\frac{\overline{d_{agg}}}{\overline{d_p}}\right)^{3-D_f}\right)^{-k}, \quad (2.32)$$

где $\overline{d_{agg}}$ – средневзвешенный по объему размер агрегата, м,

$(\overline{d_p})$ – средневзвешенный по объему размер первичной частицы, м.

Обычно при флокуляции в потоке по трубе увеличение размера агрегатов приводит к увеличению вязкости, что, в свою очередь, снижает число Рейнольдса в трубе, увеличивает коэффициент трения и, следовательно, увеличивает скорость рассеивания энергии. По сути, увеличение вязкости приводит к увеличению перепада давления, необходимого для перемещения суспензии по трубе с заданной скоростью, поэтому насосу приходится работать немного интенсивнее, и в жидкости рассеивается больше энергии. Поскольку вязкость увеличивается больше, чем скорость диссипации энергии, скорость сдвига (2.26) падает.

2.4 Определение гранулометрического состава исследуемой пробы красного шлама

В качестве исходного сырья использовались красные шламы Средне–Тиманского бокситового рудника, полученного в ходе производственной стажировки на исследуемом. Химический состав боксита характеризуется низким содержанием серы, повышенным содержанием железа и присутствием редких металлов (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Примерный химический состав боксита

Промпродукт	Содержание компонентов, масс. %						
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	S	CO ₂
Боксит СУБР	51,8	21,0	3,6	4,43	1,55	0,85	3,90
Боксит СТБР (Тиман)	47,8	27,6	6,35	0,37	2,08	0,03	0,30

Анализ гранулометрического состава исходной пробы проводился в лаборатории научного центра Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов. Для получения результата использовался лазерный анализатор частиц Микросайзер 201 (таблица 2.3), фирмы ВА Инсталт, Россия. Диапазоны размеров частиц: от 0,2 до 600 мкм.

Таблица 2.3 – Характеристики лазерного анализатора частиц Микросайзер 201

Источник излучения	He–Ne лазер
Детектор	фотодиодная матрица
Количество каналов регистрации	38
Блок пробоподготовки SP–306	
Объем камеры	100 мл
Устройство подачи образца	центробежный насос
Частота ультразвукового излучения	50 кГц
Мощность ультразвука	до 200 Вт (регулируемая)

Поскольку исследуемые частицы склонны к укрупнению и достаточно быстро оседают, для получения достоверных результатов суспензию диспергировали с помощью ультразвукового излучения и непрерывно прокачивали через кювету. За время эксперимента все частицы суспензии многократно проходят через световой пучок, что обеспечивает высокую степень усреднения результатов. Перед началом измерения в приемную камеру насоса с дистиллированной водой добавляется 10 – 12 мл стабилизатора суспензии – пирофосфата натрия концентрацией 3 – 4 г/л.

Далее выбирали диапазон размеров, соответствующий предполагаемому размеру частиц исследуемого образца, в меню «Интервал размеров». В разделе «Измерение фона» выбирали режим со снятием фона перед измерением рассеяния от образца – «Перед экспериментом». В окне «Ультразвуковой диспергатор» устанавливали мощность и время ультразвукового диспергирования. После нажатия кнопки «Анализ вещества» на экране монитора, после ультразвукового диспергирования суспензии, приблизительно через 1 мин должна появиться надпись «Отмывка», свидетельствующая об окончании измерения. Затем выполняли отмывку

жидкостной системы анализатора от измеренного образца, нажав кнопку «Отмывка». Эта операция производится автоматически. Критерием чистоты системы является возвращение амплитуды сигналов в 1–38 каналах к значениям, соответствующим чистой жидкости (сигналы фона). После окончания отмывки и появления сообщения на экране монитора отображается графическое изображение распределения массовой доли частиц по размерам. После выполнения этих операций анализатор готов к следующему измерению или выключению.

В исследуемой пробе пульпы распределения частиц по размерам располагалось в диапазоне 0,3 – 100 мкм (рисунок 2.4). По результатам анализа гранулометрического состава выявлено, что в основном твердое представлено мелкими классами, из которых класс – <0.005 мм – 75.19 % (таблица 2.4).

Поскольку вес и размер частиц шлама очень малы, они очень медленно оседают под действием силы тяжести, а поскольку они также являются полидисперсными, их частицы оседают с разной скоростью: более крупные падают быстрее, чем мелкие, а также чаще сталкиваются с ними. При наличии крупных частиц в осадке эффект осаждения лучше, а скорость оседания осадка выше [71; 104].

Следует учитывать, что результаты гранулометрического анализа отражают лишь доминирующий размер образующихся агрегатов, поскольку на размеры взвешенных частиц красного шлама оказывают влияние как природные, так и техногенные условия. Среди них — минералогический и химический состав боксита, условия транспортировки и хранения, интервал между отбором и анализом, а также диспергирование при автоклавной обработке. Распределение частиц по размерам – наиболее значимое свойство, описывающее процесс агрегации в питающем стакане и процесс осаждения в целом.

На данный момент размер частиц, в частности диаметр флокул из-под питающего стакана, не измеряется в режиме реального времени из-за невозможности внедрения измерительного прибора во внутренний объем аппарата. На исследуемом предприятии сгустители и промыватели находятся под крышками, установить датчик с периодическим вводом в измеряемую среду и очищением от заросшей на поверхности пульпы шлама является практически невозможным.

Как промежуточный итог – полученное распределение частиц по размерам было приведено согласно формулам выше к 40 исходным каналам, что является входным параметром для модели популяционного баланса.

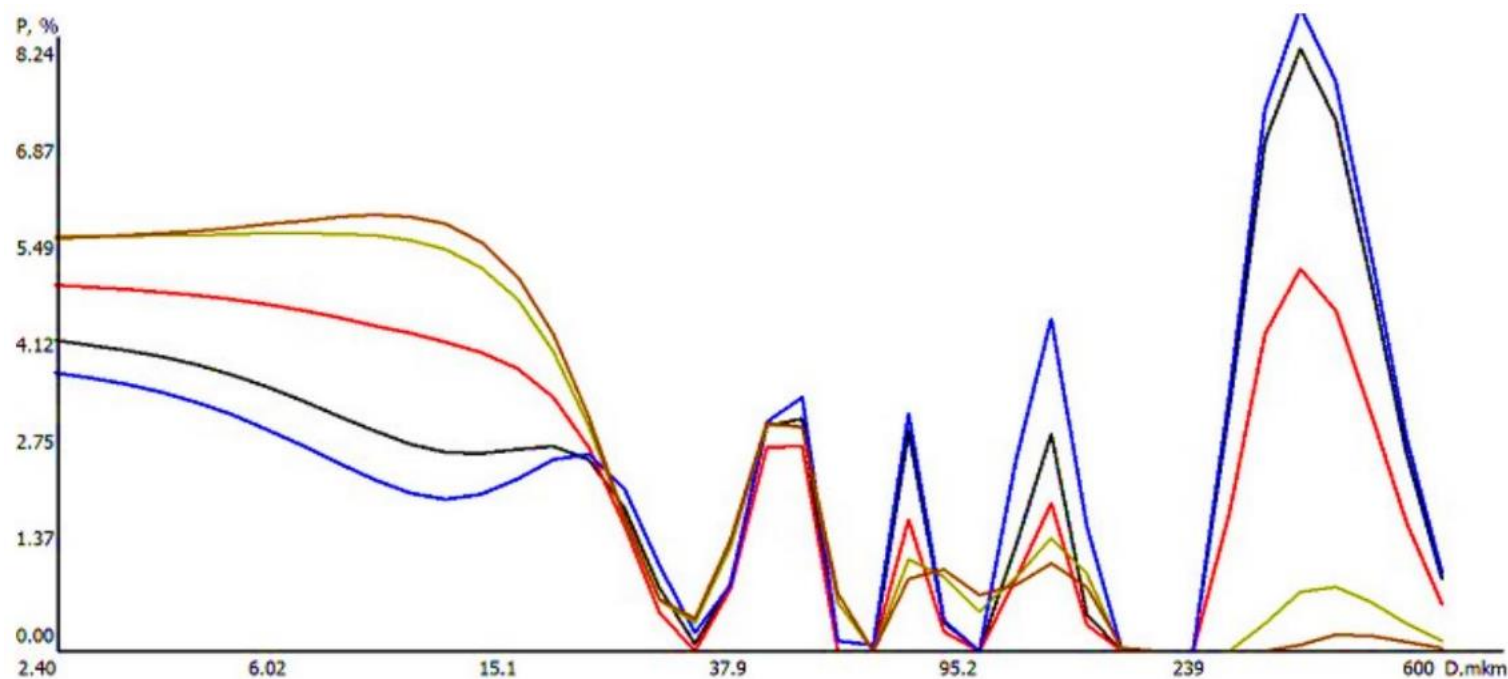


Рисунок 2.4 – Гранулометрический состав пробы КШ. Материалы автора

Таблица 2.4 – Таблица весовых долей частиц, соответствующих заданным значениям размеров частиц

№	Весовая доля частиц, %																	
1	6.3	20.3	36.0	43.5	48.9	53.2	59.9	61.0	63.2	63.0	63.1	67.7	67.7	69.3	77.1	92.2	98.5	100
2	7.5	24.6	46.4	57.9	64.8	68.5	74.5	75.2	76.5	76.4	76.4	79.6	79.6	80.5	85.3	94.9	99.0	100
3	5.6	17.9	30.7	36.5	41.5	46.4	53.5	54.9	57.3	57.0	57.2	65.4	65.4	67.1	75.5	91.6	98.4	100
4	8.5	28.5	55.5	70.4	78.7	82.9	90.3	91.4	92.6	93.2	93.6	97.0	97.0	97.0	97.3	99.0	99.8	100
5	8.5	28.6	56.5	72.5	81.2	85.5	93.1	94.1	95.2	96.0	99.6	99.3	99.4	99.4	99.4	99.7	99.9	100
D, мкм	3	5	10	15	20	30	50	70	80	90	100	150	200	250	300	400	500	600

2.5 Влияние скорости сдвига на модель агрегации и деагрегации частиц

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность гидродинамического режима в питающем стакане, является поле скоростей, формируемое потоком пульпы и обуславливающее условия сдвиговых деформаций во взвеси [95]. Эти условия критически важны для поведения флокулированных частиц КШ, поскольку именно в областях с высоким градиентом скорости возможно как интенсифицированное разрушение, так и агломерация флоккул, влияющая на эффективность последующего осаждения.

Преимущества точного определения скорости сдвига при построении модели агрегации и деагрегации частиц в присутствии флокулянта:

1. Повышение адекватности ядра агрегации: вместо задания усреднённого значения скорости сдвига G , модель опирается на реалистичные локальные значения, что позволяет точно учитывать как зоны интенсивной флокуляции, так и области возможной дефлокуляции.
2. Интеграция с CFD: использование пространственно-разрешённых данных о G из CFD-моделирования (как в Ansys Fluent) позволяет реализовать гибридную CFD–PBM модель, способную описывать распределение флоккул по размеру в каждой точке объёма [9; 10].
3. Прогнозирование качества осаждения: наличие информации о зоне формирования флоккул и скорости их разрушения даёт возможность оценивать будущую эффективность свободного осаждения, например, по закону Стокса.
4. Переход к интеллектуальным системам управления: точные данные о G могут использоваться в алгоритмах дозирования флокулянта и регулирования расхода пульпы, позволяя перейти от ручного контроля к системам предиктивного регулирования.

Кроме того, как подчёркивают авторы, агрегаты, формирующиеся в питающем стакане, обладают выраженной полидисперсностью и разнообразной морфологией. Эта неоднородность усугубляется сложностью гидродинамического режима. В таких условиях отказ от детального учёта скорости сдвига приводит к существенному искажению модели: ядра агрегации становятся либо переоценёнными, либо чрезмерно консервативными, что напрямую влияет на точность прогнозов МПБ [68; 94].

В настоящем исследовании был проведён расчёт распределения скорости сдвига G по высоте питающего стакана в зависимости от расхода пульпы, определяемый выражением (2.33):

$$G = \sqrt{2 * \text{Градиент скорости}}^2 \quad (2.33)$$

Математическое моделирование гидродинамических характеристик проводилось в заранее построенной 3D-геометрической модели питающего стакана в программе Ansys, включающей шесть горизонтальных сечений, равномерно распределённых по высоте объёмного элемента (рисунок 2.5). Каждому сечению сопоставлена определённая высота: 0.0, 0.13, 0.26,

0.39, 0.52 и 0.65 м. На данных сечениях проводился численный отбор значений градиента скорости на основе результата гидродинамического расчёта.

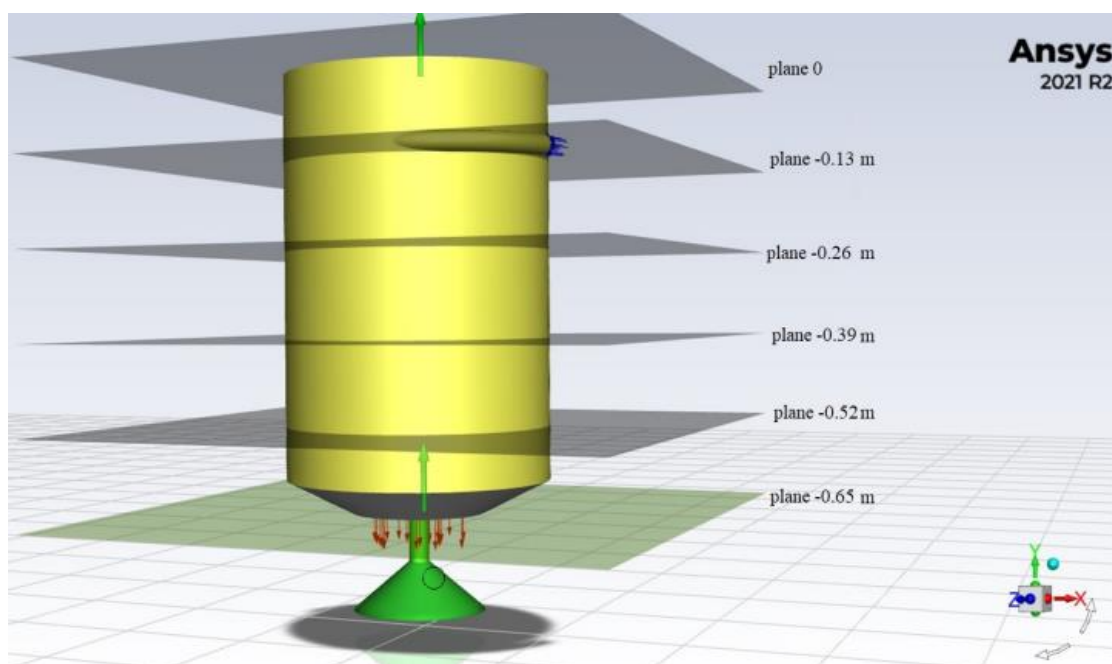


Рисунок 2.5 – Геометрическая схема модели питающего стакана с горизонтальными сечениями, на которых производился съём данных

Для анализа были смоделированы пять различных режимов расхода пульпы: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 и 2.5 кг/с. Анализ диаграммы показывает, что наибольшие значения скорости сдвига концентрируются в верхнем сечении питающего стакана (высота 0.0 м), что объясняется влиянием входного потока и соответствующим локальным градиентом скоростей. Режимы 2,0–2,5 кг/с создают интенсивную зону сдвига в верхнем объёме, потенциально опасную для разрушения флокул. Их использование требует дополнительной стабилизации флокуляции, например, увеличением дозы флокулянта или изменением конфигурации входного потока. Режимы 1,0–1,5 кг/с обеспечивают более благоприятные условия для сохранения структуры агрегатов, особенно в верхней и центральной части стакана (рисунок 2.6).

Режимы 2,0–2,5 кг/с создают интенсивную зону сдвига в верхнем объёме, потенциально опасную для разрушения флокул. Их использование требует дополнительной стабилизации флокуляции, например, увеличением дозы флокулянта или изменением конфигурации входного потока. Режимы 1,0–1,5 кг/с обеспечивают более благоприятные условия для сохранения структуры агрегатов, особенно в верхней и центральной части стакана.

Оптимальные значения скорости сдвига, способствующие агрегации без разрушения флокул, как правило, находятся в диапазоне $0,04\text{--}0,06\text{ с}^{-1}$ - именно этот диапазон преобладает на глубинах от 0,13 до 0,65 м.

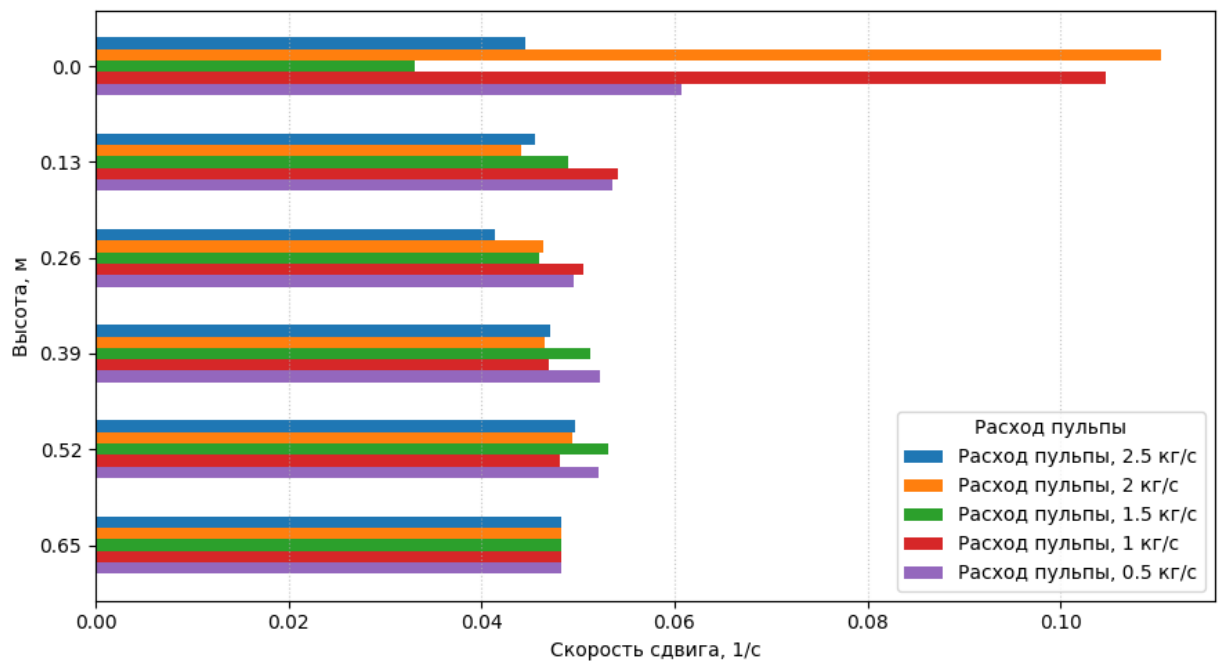


Рисунок 2.6 – Гистограмма, отражающая распределение величины скорости сдвига G по высоте стакана для пяти режимов расхода пульпы

Значения скорости сдвига, рассчитанные на различных высотных уровнях питающего стакана, служат входными данными для МПБ, позволяя локализовать зоны, в которых преобладают процессы агрегации и деагрегации. Это критически важно для калибровки ядра коалесценции и ядра разрушения в МПБ, особенно при численном моделировании, где требуется пространственно разрешённое описание кинетики флокуляции.

Анализ пространственного распределения скорости сдвига показывает, что верхняя часть питающего стакана требует особого контроля при подборе режимов питания, так как именно здесь возникают экстремальные градиенты, способные разрушать сформированные флокулы. Расчёт скорости сдвига позволяет обоснованно выбирать параметры подачи пульпы и корректировать геометрию устройства для достижения оптимальных условий флокуляции.

2.6 Программная реализация процесса агрегации пульп в присутствии флокулянта

На основе представленной математической модели и гранулометрических характеристик исходного шлама необходимо приступить к реализации модели флокуляции с учетом заданных входных параметров. Значения этих параметров были определены в ходе производственной стажировки и лабораторных исследований. Результаты расчётов модели агрегации частиц под воздействием флокулянта включают средневзвешенный диаметр частиц из-под питающего стакана, а также распределение частиц по размерам в процессе их флокуляции.

Модель процесса агрегации металлургической пульпы в присутствии флокулянта реализована на языке Python, решатель Рунге–Кутта 4-го порядка. Время расчета модели составляет около 3 минут на процессоре Intel(R) Core(TM) i3–8130U @ 2.20GHz 2.21 GHz.

Поскольку математическая модель объекта исследования представлена в форме системы уравнений, для её программной реализации потребовался инструмент, обладающий высокой степенью гибкости, а также совместимостью с широким спектром операционных систем. В качестве среды разработки пользовательского интерфейса была выбрана библиотека Tkinter, входящая в стандартный комплект поставки интерпретатора языка программирования Python.

Интеграция графического интерфейса, реализованного средствами Tkinter, с возможностями библиотеки matplotlib осуществляется посредством применения составного холста FigureCanvasTkAgg (рисунок 2.7). Этот компонент представляет собой специализированный класс, реализующий интерфейс взаимодействия с виджетом Canvas, при этом расширяя его функциональность за счёт наследования методов и добавления механизмов отрисовки графиков средствами matplotlib. Импорт данного класса осуществляется из модуля matplotlib.backends.backend_tkagg.

Входные параметры модели представлена в таблице 2.5. Данные параметры описывают свойства материала красного шлама (плотность частиц, площадь поверхности), свойства шламового раствора (плотность раствора, вязкость раствора, концентрация твердых частиц), параметры подачи флокулянта (дозировка флокулянта, скорость потока в трубопроводе), размеры питающего стакана, время моделирования. Размеры питающего стакана могут быть изменены в соответствии с различными технологиями процесса [79; 88].

Параметры, связанные с материалом красного шлама и свойствами раствора, постоянны, так как эти параметры связаны с горно–геологическими условиями бокситового месторождения и технологией процесса, т.е. являются граничными условиями. Параметр площади поверхности рассчитывается через исходный гранулометрический состав. Расход в трубе соответствует диапазону рабочих характеристик насоса, используемого в исследуемом производстве. Параметры дозировки флокулянта и концентрации твердых частиц в сырье находятся в диапазоне технологических параметров исследуемого предприятия. На основе проведенных исследований [45] установлено, что оптимальное время пребывания смеси в питающем стакане составляет 20–40 секунд. Данное значение позволяет достичь эффективного перемешивания флокулянта с суспензией шлама, предотвращая короткие замыкания потоков и обеспечивая формирование прочных флокулов с равномерным распределением размеров.

Таблица 2.5 – Входные параметры для моделирования

Параметры	Значения	Диапазон	Ед. измерения
Дозировка флокулянта	0,08	0,05–0,8	кг/т
Концентрация твердых частиц в питании	43	30–150	г/л
Расход по трубе	40	20–80	л/мин
Вязкость раствора	0,001	–	кг/м
Плотность частиц	3710	–	кг/м ³

Продолжение таблицы 2.5

Параметры	Значения	Диапазон	Ед. измерения
Площадь поверхности частицы	8,609	—	м ² /мл
Плотность раствора	1000	—	кг/м ³
Внутренний диаметр стакана	0,4	—	м
Высота стакана	1	—	м
Время выполнения моделирования	30	—	с

В частности, временной интервал в 30 секунд доказал свою эффективность для достижения равновесия между качеством агрегации частиц и производительностью питающего стакана, что подтверждает его целесообразность для моделирования процессов флокуляции.

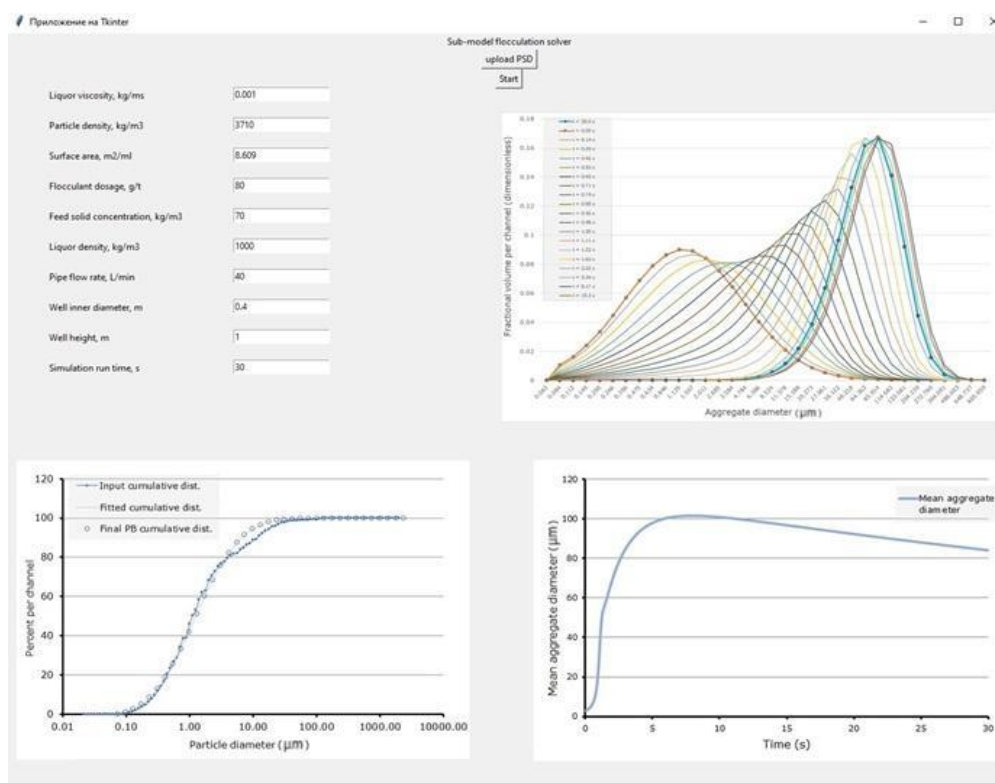


Рисунок 2.7 – Экран интерфейса для работы с моделью флокуляции. Материалы автора

Время моделирования зависит от первоначально введенного гранулометрического состава, от которого зависит количество расчетных каналов (рисунок 2.8).

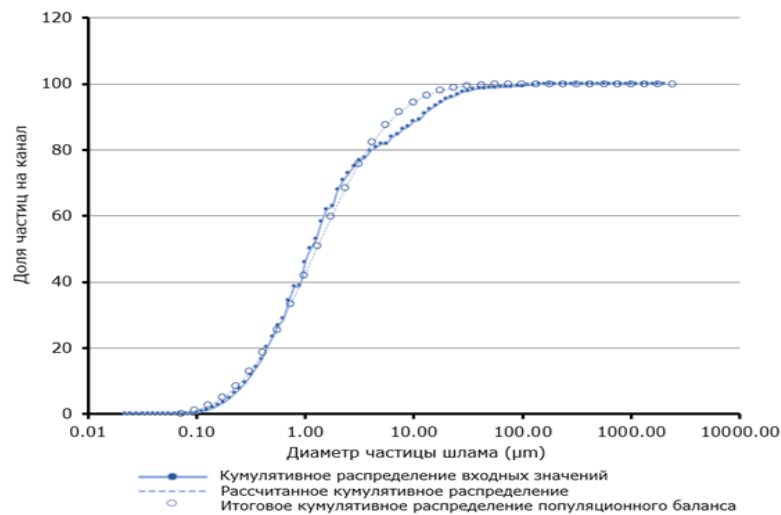


Рисунок 2.8 – Начальное распределение частиц для расчета. Материалы автора

Модель рассчитывает рост и распад частиц с определенным шагом и строит логнормальное распределение частиц по размерам (рисунок 2.9). В данном исследовании суспензия содержала преимущественно мелкие частицы, что существенно повлияло на распределение флокулированных частиц. Согласно результатам моделирования, твердые частицы после флокуляции в основном относятся к следующим классам 27–153 мкм – 85,4 % Средневзвешенный диаметр частиц составил 85 мкм (рисунок 2.10). Причина, по которой распределение становится более узким в относительном выражении, заключается в том, что процесс флокуляции стремится привести агрегаты к общему стабильному размеру.

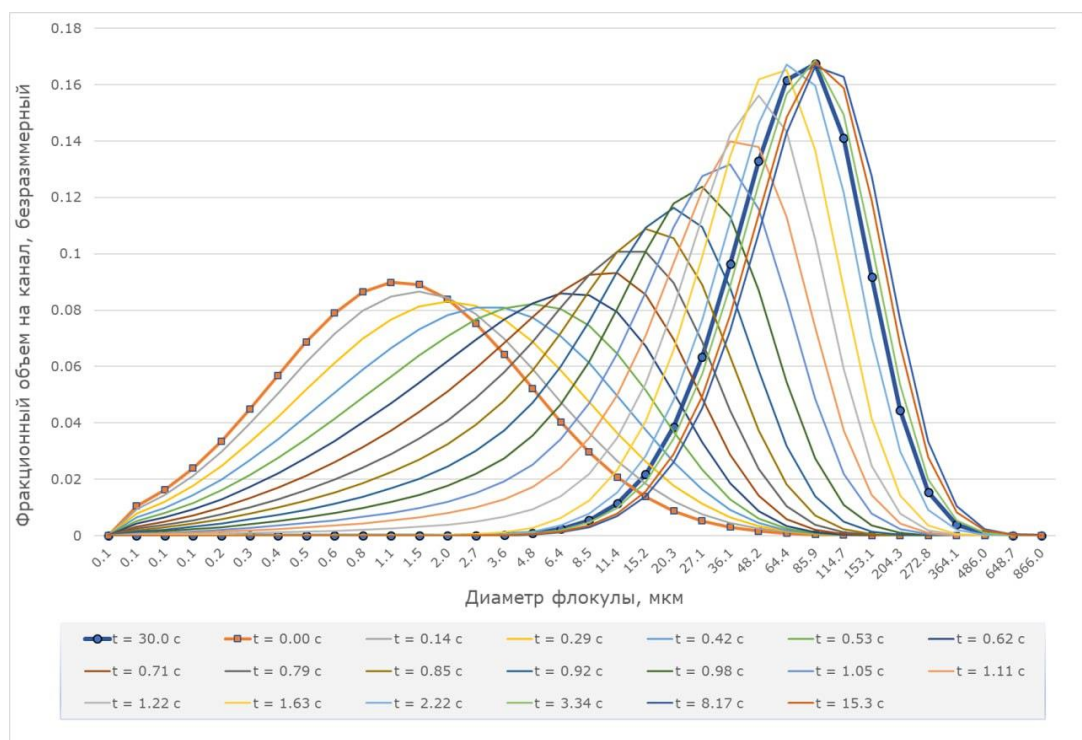


Рисунок 2.9 – Результат расчета подмодели флокуляции: распределение частиц по размерам.

Материалы автора

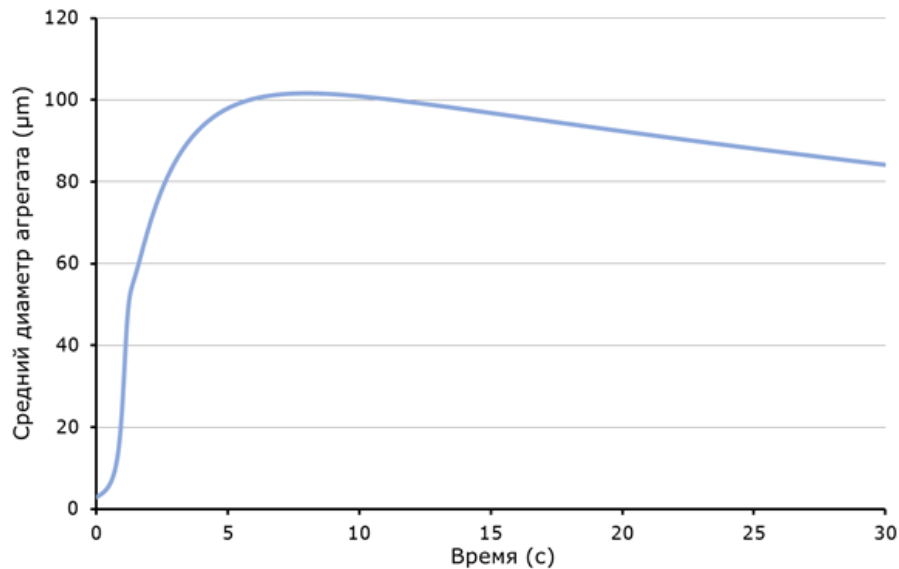


Рисунок 2.10 – Средневзвешенный диаметр частиц. Материалы автора

Мелкие агрегаты имеют тенденцию к укрупнению, тогда как крупные чаще дестабилизируются и распадаются. Деагрегация крупных частиц была учтена в модели, при увеличении времени моделирования (увеличении времени пребывания пульпы в стакане) может наблюдаться значительная степень распада частиц, что потребует либо увеличения дозировки флокулянта, либо изменения конструкции питающего стакана.

Разработанная модель может использоваться в качестве виртуального датчика не измеряемого в существующих условиях параметра средневзвешенный диаметр частицы. На основе косвенного измерения средневзвешенного диаметра частицы из-под питающего стакана и распределения частиц по размеру в процессе флокуляции в питающем стакане можно скорректировать дозировку флокулянта, что позволит не только сократить затраты на сырье, но и значительно улучшить качество ведения процесса разделения твердой и жидкой фазы [46].

Подмодель роста и распада частиц под действием флокулянта, основанная на уравнении популяционного баланса, позволяет рассчитывать средний диаметр сфлуктурированных частиц (10–500 мкм), что открывает широкие возможности её применения. Использование подмодели в качестве программного-управляемого датчика корректировать ключевые параметры процесса, такие как дозировка флокулянта, повышая качество конечного продукта и эффективность системы [24].

Подмодель может быть интегрирована в общую модель промывателя для прогнозирования поведения системы в разных условиях, а также модернизации оборудования, например, питающих стаканов, что улучшает распределение потоков и взаимодействие флокулянта с материалом. Кроме того, она обосновывает необходимость внедрения контуров управления для динамической коррекции параметров.

2.7 Верификация результатов работы модели роста и распада частиц

Поскольку в описанной и разработанной подмодели флокуляции использовались реальные исходные данные верифицировать результат работы алгоритма можно на основе опыта по осаждению пульпы в присутствии флокулянта. Все лабораторные опыты проводились при поддержке Научного центра Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

В лабораторном эксперименте использован красный шлам плотностью 3200 кг/м³, концентрация твердого вещества 43 г/л. Доза флокулянта, вводимого в цилиндр объемом 250 мл, составила примерно 0,7–0,9 мл при концентрации 0,5%, погрешность допустима из-за оборудования, используемого для введения суспензии (шприц). Доза флокулянта прямо пропорциональна содержанию твердого вещества. Поскольку концентрации твердых частиц равны, объем флокулянта в лабораторном эксперименте соответствует объему флокулянта, заложенному в модель.

Согласно технологии, реализованной на исследуемом предприятии, процессы сгущения и промывки протекают при добавлении раствора флокулянта Flomin AL P 99 VHM, концентрация которого составляет 0,05–0,2% в зависимости от конкретных условий процесса. Флокулянт поставляется на предприятие в виде порошка.

Для приготовления 250 мл раствора щелочи с концентрацией NaOH 30 г/л, нужно следовать этим шагам:

1. Рассчитать необходимое количество NaOH для приготовления раствора.

Поскольку концентрация NaOH составляет 30 г/л, то для 250 мл раствора потребуется 7,5 г NaOH ($30 \text{ г/л} \cdot 0,25 \text{ л} = 7,5 \text{ г}$).

2. Отвесить 7,5 г NaOH с помощью весов и поместить его в чистый сосуд.
3. Добавить к NaOH 250 мл дистиллированной воды и аккуратно перемешать, чтобы полностью растворить NaOH.
4. Проверить pH раствора с помощью индикаторной бумаги, чтобы убедиться, что концентрация щелочи составляет примерно 30 г/л (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Определение pH раствора. Материалы автора

Для приготовления 0,05% раствора флокулянта следовать следующим шагам: отвесить 0,1 г гранулированного порошка для приготовления 200 г 0,05%-го раствора флокулянта. Налить 100 г холодной дистиллированной воды в лабораторный стакан объемом 250 мл, предназначенный для приготовления раствора. Согласно установленным технологическим нормам, для создания раствора флокулянта необходимо добавить гидроксид натрия в концентрации 10 г на 1 литр (0,5 грамм на 200 грамм раствора). Таким образом создается щелочная среда, способствующая более эффективному взаимодействию твердых частиц пульпы с флокулянтом. В результате требуется меньшее количество полимера для достижения необходимого эффекта [34].

Отвесить 0,5 г гранулированного NaOH и добавить его через сухую воронку в лабораторный стакан. Налить 100 г холодной дистиллированной воды в лабораторный стакан, ополаскивая воронку. Добавить 0,1 г флокулянта в лабораторный стакан. Перемешивать раствор при помощи магнитной мешалки в течение 40 минут. Раствор должен стать однородным и вязким, тянуться "нитью" за лабораторной палочкой (рисунок 2.12). В растворе не должно быть не растворившихся хлопьев. Скорость вращения якоря магнитной мешалки не должна превышать 2 об/с. Затем оставить приготовленный раствор флокулянта на час для образования макромолекул.



Рисунок 2.12 – Готовая суспензия флокулянта Flomin AL P 99 VHM. Материалы автора

При приготовлении флокулянта учитывали следующие моменты:

1) частота вращения якоря магнитной мешалки при растворении эмульсии не должна превышать 2 об/с. Это обусловлено тем, что скорость осаждения флокулов, образованных при

обработке КШ реагентом, при такой частоте в несколько раз выше, чем в растворе, приготовленном при 20 об/с, т.к. при высоких скоростях вращения возрастает уровень касательных напряжений в жидкости, что приводит к разрушению набухших частиц флокулянта;

2) Гранулы флокулянта добавляются непосредственно к щелочному раствору. Перемешивание раствора ведется в течении 30 минут при помощи магнитной мешалки, далее необходимо оставить приготовленный раствор в покое на 60 минут для формирования макромолекул.

Для приготовления пробы осаждаемой пульпы в цилиндре объемом 250 мл необходимо было отмерить 10,9 г исследуемого шлама и разбавить щелочной водой (рисунок 2.13). Суспензию нагревали в термостате до достижения температуры от 50 до 80 °С градусов (рисунок 2.14). Этот температурный диапазон соответствует температуре процесса в промывателях.



Рисунок 2.13 – Навеска исследуемого КШ для приготовления суспензии. Материалы автора

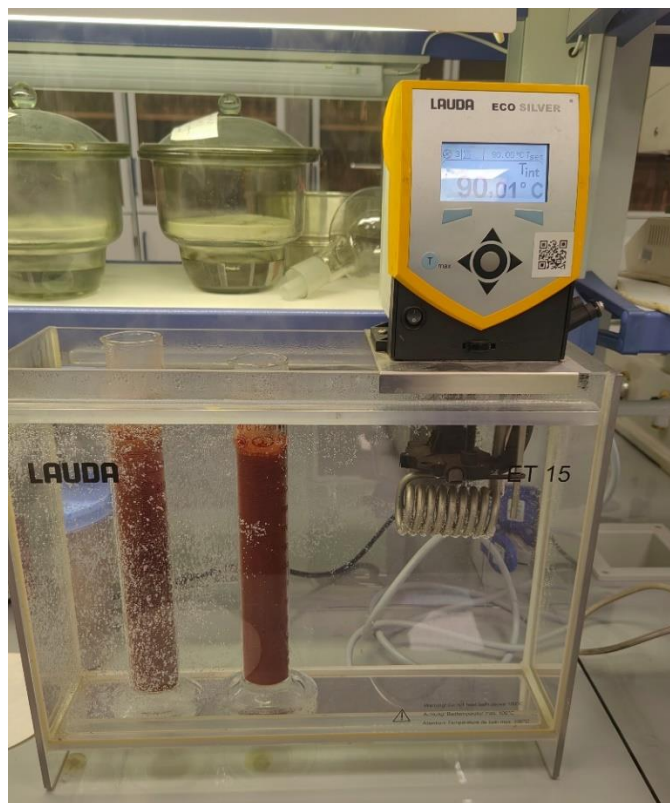


Рисунок 2.14 – Подогрев суспензии до температуры соответствующей технологии. Материалы автора

Для соблюдения условия полной гомогенизации пульпы с сохранением исходных свойств осадка цилиндр перемешивают неинтенсивно десятикратным вводом плунжера по высоте стакана, такой способ перемешивания используется в отечественной практике при подготовке пробы к седиментации [38].

В нагретой пробе подготовленной пульпы с концентрацией твердого вещества 43 г/л фиксируют начальную высоту до добавления флокулянта (рисунок 2.15). Доза флокулянта с концентрацией 0,5 % равна 0,7 мл. В таких экспериментах на осаждение обычно высота поверхности раздела регулярно фиксируется до момента, пока не будет достигнута постоянная высота песков.

Время флокуляции было равно 30 секундам, это значение ранее задавалось в качестве времени моделирования в подмодели флокуляции (2.7), чтобы соответствовать времени седиментации суспензии в присутствии флокулянта в лабораторном эксперименте, так как этого времени было достаточно для проведения полной седиментации, а значит и завершения процесса флокуляции.

В ходе экспериментальных исследований были получены фотографии скоплений сфлокулированного красного шлама, на которых флокула (рисунок 2.16) может быть охарактеризована как асимметричное образование, окружающее осажденные агрегаты.

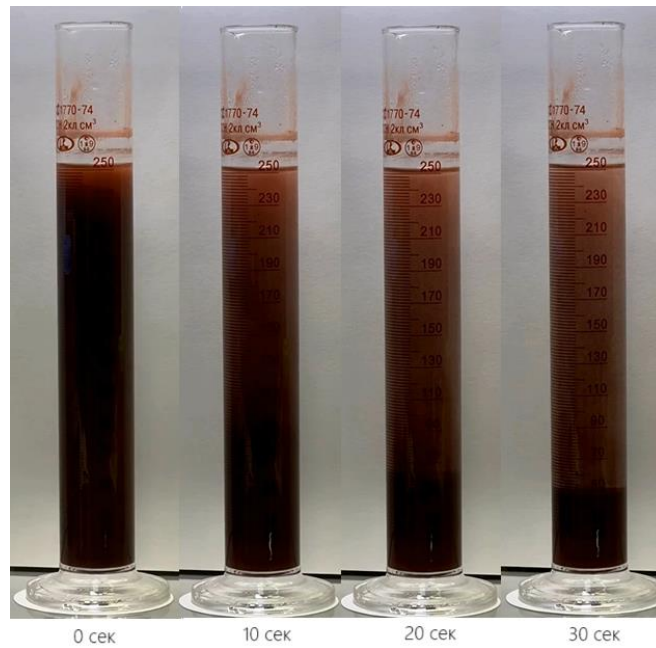


Рисунок 2.15 – Осаждение красного шлама начальной концентрацией твердых частиц 43 г/л.

Материалы автора

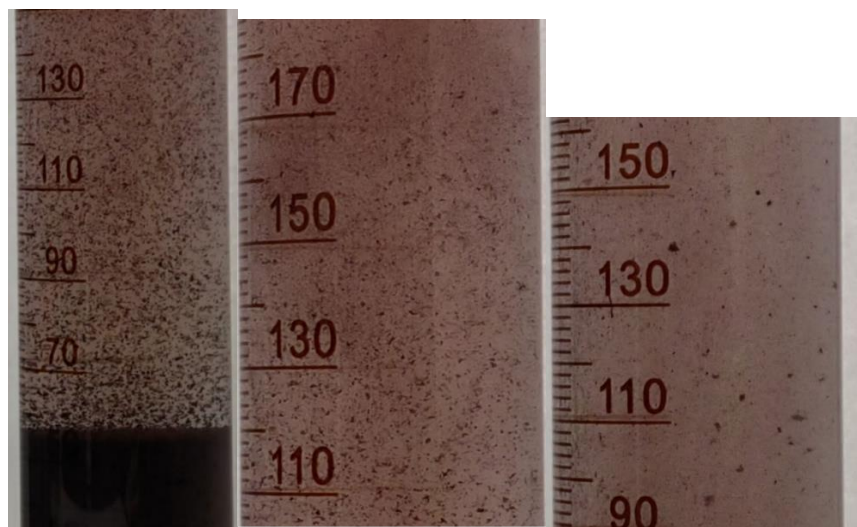


Рисунок 2.16 – Сфлокулированные частицы по уровню осажденной пульпы и в взвеси.

Материалы автора

Эти изображения также помогли проверить модель популяционного баланса, учитывающую размер осажденных агрегатов и симметрию флоккулы. Изображения были получены с помощью микроскопа и капельного метода исследования. Пробы флоккулы отбирались пипеткой объемом 2 мл в процессе взаимодействия осажденной пульпы и флоккулянта и переносились на предметное стекло микроскопа (рисунок 2.17). Для получения изображений флоккулированной пульпы использовался микроскоп АОМЕКІЕ 64–640.

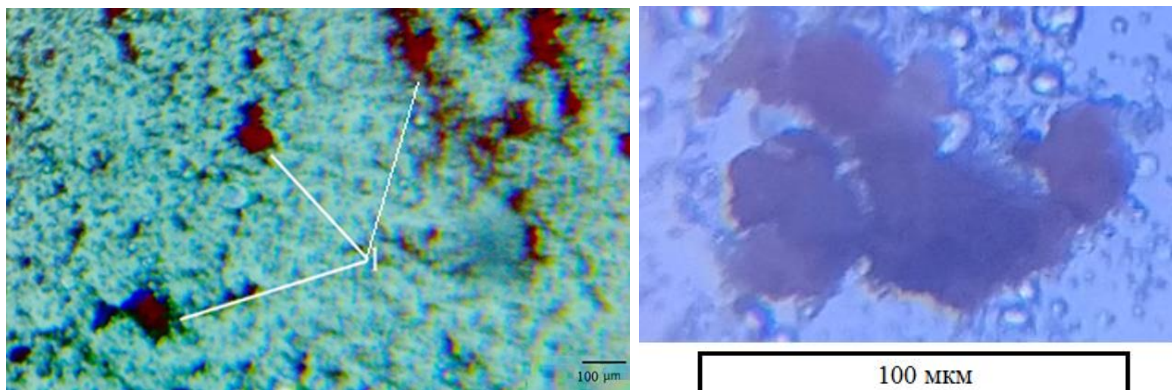


Рисунок 2.17 – Проба сфлуктурированной частицы под микроскопом. Материалы автора

В процессе подготовки лабораторного эксперимента были изучены различные способы проверки моделей, подобных разработанной, например, с помощью датчика FBRM, анализатора размера частиц и дзета-потенциала. В случае использования подобного оборудования необходимо разбавлять образец, что также может привести к разложению образовавшейся флоккулы. Для отбора проб в промывателях используются различные типы оборудования, включая динамические пробоотборники пересеченного типа, статические вакуумные пробоотборники и устройства для забора слива и сгущенного продукта. Вакуумные пробоотборники работают за счёт создания разрежения, что позволяет забирать материал из ёмкостей, но при этом также разрушает флоккулы. Наиболее крупные и стабильные флоккулы, сосредоточенные в вертикальном потоке, не могут быть полноценно проанализированы из-за деструкции при транспортировке. Это ограничивает возможности контроля параметров пульпы, которые существенно влияют на эффективность сгущения и промывки.

Полученные средние значения сравниваются с расчетным значением «среднего диаметра агрегата» по модели, равным 85 мкм. Среднеквадратичное отклонение для параметра «средний диаметр флуккулы» равно 14 мкм (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Результаты серии опытов по определению размера флоккулы

Номер эксперимента														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Диаметр частицы, мкм														
143	97	76	138	152	105	127	115	91	120	138	135	89	109	95
92	109	141	112	111	72	111	115	75	45	47	103	152	58	148
38	84	107	119	101	93	69	45	148	92	100	111	101	43	123
131	36	38	70	37	52	130	69	83	38	116	65	114	96	143
63	152	62	131	148	54	98	90	103	113	105	131	62	128	112
Средний размер частицы, мкм														
93,3	95,7	84,9	113,7	109,9	75,3	107,1	86,8	99,8	81,4	101,3	109,1	103,7	86,8	124,2
Среднеквадратичное отклонение, мкм														
14														

Время, затраченное на расчет модели, значительно меньше инерционности каждого из каналов связи для исследуемого промывателя радиального типа. Результат моделирования флокуляции, а именно средний диаметр агломерата, используется в качестве начального значения для последующих подпроцессов разделения твердой и жидкой фаз.

Выводы к главе 2

В данной главе была представлена математическая модель процесса агрегации металлургической пульпы в присутствии флокулянта, которая позволяет более детально описать взаимодействие частиц, их укрупнение и распад. Рассмотрены основные конструкции питающих стаканов, их преимущества и недостатки, а также влияние конструктивных особенностей на процесс флокуляции и распределение твердых частиц в промывателе.

Разработанная модель демонстрирует высокую степень универсальности, позволяя адаптировать ее для анализа широкого диапазона условий, характерных для процессов сгущения и промывки. Модель реализована на языке Python, решатель Рунге–Кутта 4 порядка. Временные затраты, требующиеся на расчет модели, составляют порядка 3 минут на процессоре Intel(R) Core(TM) i3–8130U CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz. Среднее квадратическое отклонение по параметру «средневзвешенный диаметр флокулы» равен 14 мкм.

Применение представленной модели может быть полезным для повышения эффективности разделения твердой и жидкой фаз, снижения расхода реагентов и повышения стабильности работы технологических установок. Модель может служить основой для создания предиктивных систем управления, обеспечивая более точное планирование и контроль процессов агрегации.

Поскольку на исследуемом предприятии данный тип аппарата используется, как на ветке сгущения, так и ветке промывки красного шлама, использовать полученный в ходе исследования результат возможно в существующей структуре АСУ ТП. Например, в качестве надстройки над существующей SCADA–системой с целью визуализации неизмеряемого в текущих условиях параметра «средневзвешенный диаметр флокулы из–под питающего стакана» на мнемосхеме оператора, т.е. своего рода виртуальный программный прибор для измерения гранулометрического состава агрегированной пульпы. Также данный параметр может использоваться в системе управления в качестве одного из целевых параметров в каскадной системе управления для корректировки расхода флокулянта. Необходимо отметить, что процесс агрегации, протекающий в питающем стакане, является одним из подпроцессов в сгустителе или промывателе радиального типа, а, следовательно, модель, описывающая процесс флокуляции пульпы красного шлама в стакане – часть общей модели объекта управления. Так же данную

модель можно использовать в качестве предиктивной модели в технологии усовершенствованного управления.

Перспективы дальнейших исследований включают усовершенствование модели с учетом сложных химических и термодинамических факторов, а также расширение ее применения на другие типы технологических процессов, связанных с укрупнением частиц. Таким образом, разработанная модель не только отражает ключевые аспекты флокуляции, но и закладывает фундамент для внедрения интеллектуальных решений в управление производственными процессами.

ГЛАВА 3 ОБОБЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОМЫВАТЕЛЯ

3.1 Однокамерный промыватель

Ранее в главе 1 были описаны различные типы промывателей, используемые в технологии противоточной декантации. На исследуемом предприятии в связи с переходом на переработку боксита Средне–Тиманского бокситового рудника и повышением шламовой нагрузки на систему промывки было принято решение реконструировать используемый многокамерный промыватель в серию однокамерных. На рисунке 3.1. представлена схема однокамерного промывателя, используемого в процессе противоточной промывки КШ на исследуемом предприятии.

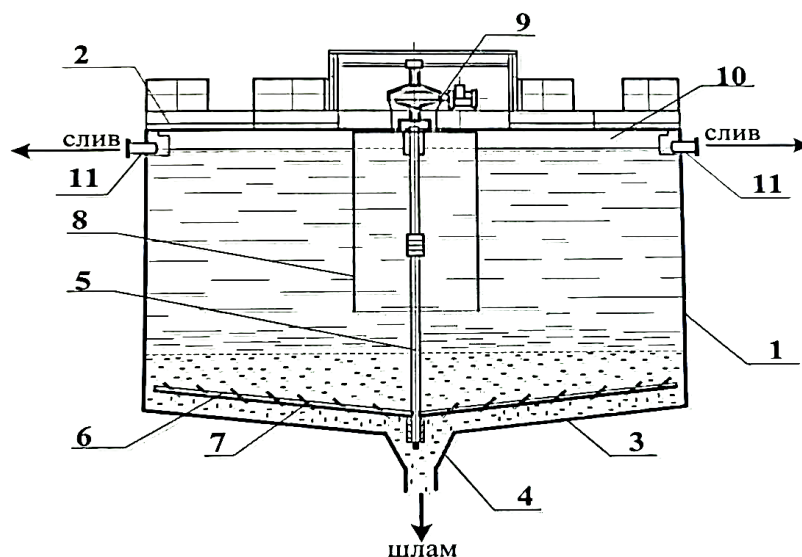


Рисунок 3.1 – Однокамерный радиальный сгуститель с центральным приводом. Материалы по результатам производственной стажировки

Площадь осаждения одноярусного радиального сгустителя составляет 177 м². Диаметр промывателя – 15 м, высота – 9,5 м. Корпус промывателя представляет собой стальной цилиндрический бак (1) с крышкой (2) и коническим днищем (3). Днище имеет наклон к центральной оси промывателя около 8° и в центральной части переходит в разгрузочный конус с патрубком (4), через который сгущенный шлам удаляется из аппарата. Гребковый механизм состоит из вертикального вала (5), на нижнем конце которого закреплена гребковая рама из четырех граблей (6) с гребками (7). Вал подвешен к верхнему поясу фермы по оси корпуса промывателя на винтовом подвесе с приводом подъема и опускания всего гребкового механизма. Высота подъема системы гребков ограничена наличием питающего стакана – цилиндра (8), также смонтированного по оси корпуса аппарата на уровне поверхности пульпы. Гребки (7) расположены под углом, что обеспечивает перемещение осевшего шлама от краев к центру, к разгрузочному патрубку. Вал приводится в движение электродвигателем через ременную передачу и редуктор (9) (рисунок 3.2). Скорость вращения вала – 7 об/мин [96; 102].



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – а) крышка промывателя, б) нижний конус откачки сгущенного шлама, в) вертикальный вал граблин. Материалы по результатам производственной стажировки

Пульпа поступает в центр промывателя через питающий стакан диаметром 3,2 м и высотой 5,31 м. Для снижения содержания твердого в пульпе питания перед питающим стаканом установлен эжектор. Для увеличения времени взаимодействия пульпы и флокулянта в питающий стакан врезана полка, ширина которой составляет 0,32 м (соотношение ширины полки к диаметру питающего стакана – 0,1). Расстояние от полки до крышки промывателя – 2,010 м, до зеркала слива – 1,7 м. Сверху сгуститель закрыт металлической крышкой (2) с люками для ремонта и чистки аппарата. Для контроля зоны осветленного раствора предусмотрен специальный мерник, обеспечивающий контроль на уровне 6,0 м [31].

Диаграмма, показывающая взаимосвязь между различными входными и выходными параметрами промывателя, представлена на рисунке 3.3. Входными параметрами процесса являются: расход КШ, расход флокулянта, гранулометрический состав КШ, концентрация твердых частиц в питании, время пребывания флокулянта, скорость граблин, скорость откачки

нижнего потока. Выходными параметрами являются: концентрация твердых частиц в верхнем продукте, уровень постели, концентрация твердых частиц в промытом КШ. Важно отметить, что входные параметры не влияют на конечный результат процесса напрямую, поскольку процесс разделения жидкости и твёрдого вещества состоит из нескольких подпроцессов, а именно: подмодели флокуляции, подмоделей свободного и стесненного осаждения.

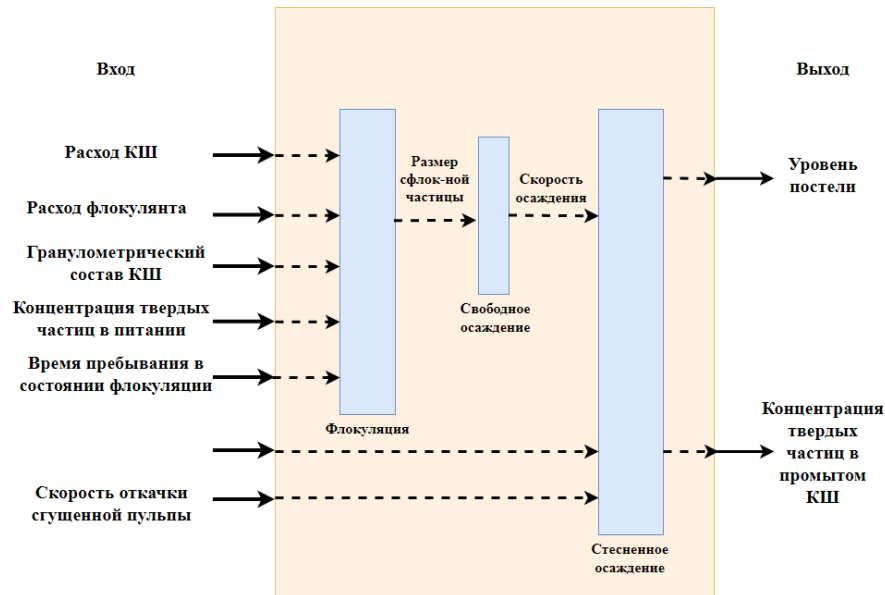


Рисунок 3.3 – Упрощенная схема процесса сгущения с входными и выходными параметрами.

Материалы автора

В подмодели зоны свободного и стеснённого осаждений в качестве входных параметров используется средний размер сфлуктурированной частицы, полученный по результатам работы подмодели флокуляции. Таким образом описанная и реализованная в главе 2 модели агрегации КШ в присутствии флокулянта является не обособленным решением отдельной задачи в рамках теории осаждения твердых частиц, а лишь одним из шагов для перехода к описанию полной обобщенной модели процесса, протекающего в объеме аппарата однокамерного промывателя [33; 99].

3.2. Математическое описание свободного осаждения

Зона свободного осаждения характеризуется движением твёрдых частиц под действием силы тяжести, при этом взаимодействие между частицами минимально. Процессы в этой зоне описываются фундаментальными законами механики и гидродинамики, в частности, законом Стокса, который определяет скорость осаждения частиц в жидкости [13].

Основные силы, действующие на частицу:

1. Сила тяжести F_g (3.1):

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_t g, \quad (3.1)$$

где r – радиус частицы, мкм,

ρ_t – плотность твёрдой частицы, кг/м³,

g – ускорение свободного падения, м/с².

2. Выталкивающая сила Архимеда (F_a) (3.2):

$$F_a = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l g, \quad (3.2)$$

где ρ_l – плотность жидкости.

3. Сила сопротивления среды F_d (3.3): согласно закону Стокса, для ламинарного течения при малых числах Рейнольдса:

$$F_d = 6\pi\eta r v, \quad (3.3)$$

где η – динамическая вязкость жидкости, Па·с

v – скорость осаждения частицы, м/с.

Предполагается, что в зоне ниже питающего стакана устанавливается ламинарный режим течения жидкости и частицы движутся по направлению потока вниз к сливному отверстию, не мешая друг другу. В установившемся режиме сумма сил тяжести и выталкивающей силы равна силе сопротивления (3.4):

$$F_g + F_a = F_d \quad (3.4)$$

Подставляя выражения для сил, получаем (3.5):

$$\frac{4}{3}\pi r^3 (\rho_s - \rho_l) g = 6\pi\eta r v \quad (3.5)$$

Решая относительно скорости v (3.6):

$$v = \frac{2r^2(\rho_s - \rho_l)g}{9\eta}, \quad (3.6)$$

где ρ_s , ρ_L – плотность твердой фазы и жидкой фазы соответственно, кг/м³,

r – радиус частицы, мкм,

g – ускорение свободного падения, м/с²,

η – вязкость жидкой фазы, Па·с.

Этот результат был впервые получен Джорджем Габриэлем Стоксом в середине XIX века в ходе анализа движения сферических тел в вязкой жидкости. Его работа заложила основу для теоретического описания процессов осаждения в ламинарных условиях [19; 72].

Фактическая скорость осаждения частиц в зоне свободного осаждения отличается от скорости, рассчитываемой по формуле Стокса, поскольку сфлитулированные частицы имеют не шарообразную форму, имеет место гидродинамическое взаимодействие сфлитулированных частиц между собой из-за высокого содержания твердой фракции в пульпе. Применение закона Стокса допустимо при следующих условиях: малое число Рейнольдса: режим течения вокруг частицы должен оставаться ламинарным; сферическая форма частиц: закон выводился для

идеализированных сферических объектов; гомогенная и ньютоновская жидкость: вязкость среды постоянна и не зависит от скорости деформации; минимальное взаимодействие частиц: частицы должны осаждаться независимо друг от друга.

Для условий ламинарного движения скорость осаждения отдельно взятой частицы (3.7):

$$v = \frac{g \cdot (\rho_S - \rho_L) \cdot d_{floc}^2}{18 \cdot \mu} \quad (3.7)$$

где ρ_S , ρ_L – плотность твердой фазы и жидкой фазы соответственно, кг/м³,

d_{floc} – диаметр сфлуктурированной частицы на выходе из-под питающего стакана, м

g – ускорение свободного падения, м/с²,

μ – вязкость жидкой фазы, Па·с.

3.3 Математическое описание стесненного осаждения

Теория, разработанная Джоном Ричардсоном и Уильямом Заки, описывает осаждение частиц в суспензиях, где увеличивающаяся концентрация твёрдой фазы начинает существенно влиять на скорость осаждения.

При достижении точки критической концентрации (гелевой точки) φ_c происходит переход из зоны свободного осаждения в зону стесненного осаждения. Уравнение было предложено в 1954 году Джоном Фрэнсисом Ричардсоном и Уильямом Нэпьером Заки в их работе [78]. Они провели систематические исследования осаждения частиц в жидкостях при различных концентрациях и разработали эмпирическое уравнение, учитывающее влияние концентрации твёрдой фазы на скорость осаждения. В таких системах частицы не оседают независимо, и их коллективное поведение необходимо учитывать при моделировании процессов осаждения.

Скорость осаждения частиц в концентрированной суспензии определяется выражением (3.8):

$$v = v_0 \cdot (1 - \varphi)^n, \quad (3.8)$$

где v_0 – скорость осаждения одиночной частицы в бесконечно разбавленной среде (скорость Стокса, описанная ранее), м/ч,

φ – локальная концентрация твёрдой фазы, объёмных долей %

n – индекс стесненного осаждения, безразмерная величина.

Значение показателя n зависит от режима течения и свойств частиц: для ламинарного режима осаждения (число Рейнольдса менее 0,2) значение n обычно составляет около 4,65; при переходе к турбулентному режиму значение n уменьшается и может достигать 2,4.

Это значение были определены экспериментально и могут варьироваться в зависимости от конкретных условий процесса.

Для малых концентраций ($\varphi \rightarrow 0$) частицы осаждаются независимо, а скорость осаждения (v) приближается к скорости Стокса для одиночной частицы (v_0). Однако с ростом концентрации (φ) осаждение замедляется из-за гидродинамических взаимодействий частиц. Этот эффект связан с увеличением сопротивления среды и уменьшением подвижности частиц в суспензии.

Критическая концентрация (φ_c) определяется как значение φ , при котором начинается стеснённое осаждение. При $\varphi < \varphi_c$ частицы движутся независимо, и процесс характеризуется свободным осаждением. При $\varphi > \varphi_c$ частицы вступают во взаимодействие, образуя плотную структуру, что приводит к экспоненциальному снижению скорости осаждения.

При достижении критической точки и начала процесса консолидации плотность потока стремится к 0. Описать данный процесс можно с помощью функции плотности потока $f_{bk}(\varphi)$ (3.9)

$$f_{bk}(\varphi) = \begin{cases} -\frac{\Delta\rho\varphi^2(1-\varphi)^2g}{\mu K(\varphi)}, & \varphi < \varphi_c \\ -\frac{k(\varphi)}{\mu}\Delta\rho\varphi^2g, & \varphi \geq \varphi_c \end{cases}, \quad (3.9)$$

где $k(\varphi)$ – проницаемость осадка, м²,

$K(\varphi)$ – коэффициент сопротивления для движения твердого тела в жидкости, Па·с/м,

n – индекс стесненного осаждения, безразмерная величина.

Уравнение Терзаги, разработанное для описания консолидации грунтов, было успешно адаптировано для описания процессов уплотнения осадков. Оно определяет выделение жидкости из пор осадка под действием давления вышележащих слоёв. Основное уравнение (3.10):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial h^2}, \quad (3.10)$$

где u – давление пор, Н/м²,

c_v – коэффициент консолидации, зависящий от проницаемости среды и её сжимаемости, м²/с,

t – время, с,

h – координата по высоте, м.

Эффективное напряжение (3.11), возникающее при консолидации, отражает давление, передаваемое через контактные точки частиц. Это напряжение увеличивается с ростом концентрации твёрдой фазы (φ) и уменьшением порового давления, что приводит к уплотнению осадка.

$$\sigma'_e(\varphi) = \begin{cases} Const, & \varphi < \varphi_c \\ \sigma_0 \left(\left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^c - 1 \right), & \varphi \geq \varphi_c \end{cases}, \quad (3.11)$$

где σ_0 – начальное эффективное напряжение при $\varphi = \varphi_c$, Н/м²,

c – показатель, определяющий скорость роста напряжения с концентрацией, безразмерная величина,

φ_c – критическая концентрация, после которой осадок начинает уплотняться, объёмных долей %.

Формула позволяет учесть переход от свободного осаждения $\varphi < \varphi_c$ к стеснённому осаждению и уплотнению $\varphi \geq \varphi_c$. Параметры σ_0 и c можно настроить на основе экспериментальных данных для конкретного осадка, что делает формулу универсальной. Константа при $\varphi < \varphi_c$ отражает слабую взаимосвязь частиц, а зависимость для $\varphi \geq \varphi_c$ моделирует рост напряжения из-за взаимодействия частиц в уплотнённой фазе.

Комбинация уравнений Ричардсона-Заки и Терзаги позволяет описать изменения концентрации твёрдой фазы (φ) по высоте в зоне уплотнения аппарата промывателя. Полученное уравнение (3.12) дифференциальное уравнение, справедливое для всего диапазона концентраций.

$$\frac{d\varphi}{dh} = - \frac{\Delta\rho\varphi g}{f_{bk}(\varphi)\sigma'_e(\varphi)} (q_\varphi + f_{bk}(\varphi) - q_{\varphi UF}), \quad (3.12)$$

где h – высота аппарата, м,

$\Delta\rho = \rho_t - \rho_l$ – разность плотностей фаз, кг/м³,

$f_{bk}(\varphi)$ – коэффициент сопротивления среды, м²,

$\sigma'_e(\varphi)$ – производная эффективного напряжения, Н/м²,

$q_\varphi, q_{\varphi UF}$ – потоки твёрдой и жидкой фаз соответственно, м³/м²·с.

Производная эффективного напряжения берется на основе указанной формулы 3.13:

$$\sigma'_e(\varphi) = \frac{\partial}{\partial\varphi} \left[\sigma_0 \left(\left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^c - 1 \right) \right], \quad (3.13)$$

что дает уравнение (3.14):

$$\sigma'_e(\varphi) = \sigma_0 c \frac{1}{\varphi_c} \left(\frac{\varphi}{\varphi_c} \right)^{c-1}, \quad \varphi \geq \varphi_c \quad (3.14)$$

3.3. Лабораторный эксперимент для получения параметров модели

Для получение следующих параметров модели: скорость осаждения по Стоксу (v_0), критическая точка концентрации (гелевая точка) (φ_c), индекс стесненного осаждения (n) необходимо провести опыты по осаждению шлама разных концентраций [42]. Основные методы расчета параметров можно представить двумя категориями, основанными на макроскопических и кинематических уравнениях баланса.

Расчетный метод Коу и Клевенджера определяет начальную скорость осаждения суспензии в зависимости от концентрации питания и критической концентрации. Эти ученые были первыми, кто использовал данные, полученные в ходе эксперимента по периодическому

осаждению с использованием лабораторного цилиндра, для проектирования промышленного сгустителя. Они предположили, что скорость осаждения твердых частиц зависит только от концентрации исходного шлама. Однако в зоне сжатия предположение не выполняется, поскольку объемная доля твердых частиц также изменяется с глубиной. Уравнение Коу и Клевенджера не позволяет точно оценить площадь поперечного сечения резервуара при обработке суспензии флокулирующим агентом [99].

Теория седиментации Кинча, являющаяся кинематической моделью, предполагает быстрый и надежный подход для измерения влияния концентрации входного потока на кривые осаждения. Однако теория предполагает, что пристеночный эффект и взаимодействие между частицами отсутствуют, скорость осаждения является функцией от концентрации пульпы. Оба этих допущения ограничивают точность расчетов [12].

Преимущество метода Кинча в том, что для анализа кривой осаждения достаточно одного опыта, в то время как метод Коу и Клевенджера требует нескольких определений скоростей осаждения. Поэтому результаты исследований, использующие метод Кинча, более актуальны на современных производствах, хотя расчет по методике Коу-Клевенджера также популярен [27; 80].

3.4 Получение эмпирических параметров для расчета модели промывателя

Ряд параметров для модели (скорость Стока, индекс стесненного осаждения, критическую концентрацию) необходимо было получить по результатам осаждения КШ в присутствии флокулянта. Для проведения лабораторного опыта и получения необходимых параметров опыт использовался флокулянт Flomin AL P 99 VHM. Основные пункты о приготовлении суспензии флокулянта и подготовки щелочного раствора для осаждаемой пульпы подробно описаны в главе 2. Для данного опыта были подготовлены образцы пульпы с различными концентрациями твердого вещества (таблица 3.1):

Таблица 3.1 – Пробы КШ с различной концентрацией твердого вещества

Образцы	1	2	3	4	5
Концентрация, г/л	15	30	45	60	75
Концентрация на 250 мл	3,64	7,28	10,92	14,56	18,2
Объемная доля %	0,47	0,94	1,4	1,8	2,34

3.4.1 Применение технологии машинного зрения для определения параметров осаждения

Для анализа скорости осаждения твердых частиц была разработана методика обработки видео данных, позволяющая автоматически фиксировать изменения уровня осветленной жидкости и скорости движения частиц в вертикальных цилиндрах. Данный подход обеспечил

высокую точность измерений и минимизацию ошибок, связанных с субъективным визуальным наблюдением [79]. Этапы обработки результатов осаждения включали следующие пункты:

1. Получение видео данных процесса осаждения:

Видео процесса осаждения записывались с использованием камеры, расположенной напротив прозрачных цилиндров объёмом 250 мл, заполненных пульпой с различной концентрацией твердой фазы. Частота кадров была выбрана достаточной для отслеживания динамики интерфейса между осветленной жидкостью и зоной осаждения. Это обеспечивало высокую точность определения скорости осаждения.

2. Предварительная обработка видео:

Записанные видеоролики подвергались сегментации, в рамках которой программа выделяла область каждого цилиндра. Видео нарезались на отдельные кадры с заданной периодичностью. Все кадры сохранялись в отдельной папке для дальнейшей обработки. Для устранения визуального шума и улучшения контрастности между слоями осветленной жидкости и зоны осаждения применялась нормализация яркости и подавление артефактов.

3. Создание аннотаций для обучения модели:

Для обучения программы автоматически определять уровень жидкости в цилиндрах был использован инструмент LabelImg. Пользователь вручную выделял область уровня жидкости на каждом кадре и добавлял текстовую метку для её классификации. На каждый уровень задавалось не менее трёх аннотаций. Программа автоматически проверяла соответствие между кадрами и аннотациями. В случае недостаточного числа аннотаций или расхождений в метках программа уведомляла пользователя, чтобы ошибки могли быть исправлены.

4. Обучение нейронной сети для анализа изображений:

Обучение модели осуществлялось с использованием заранее подготовленных аннотированных данных. В качестве базовой модели использовалась предобученная сеть MobileNetV2, адаптированная для задачи определения уровня жидкости. Для увеличения объёма данных применялась аугментация, включавшая сдвиг, вращение и изменение яркости изображений. Это позволило повысить устойчивость модели к различным условиям освещения и перспективным искажениям. Были заданы ограничения: программа не должна предсказывать уровни ниже 35 мл или выше 250 мл, что предотвращало некорректные результаты.

5. Анализ видеоданных и построение кривых осаждения:

После обучения модель анализировала кадры видео, определяя положение интерфейса осветленной жидкости (рисунок 3.4).

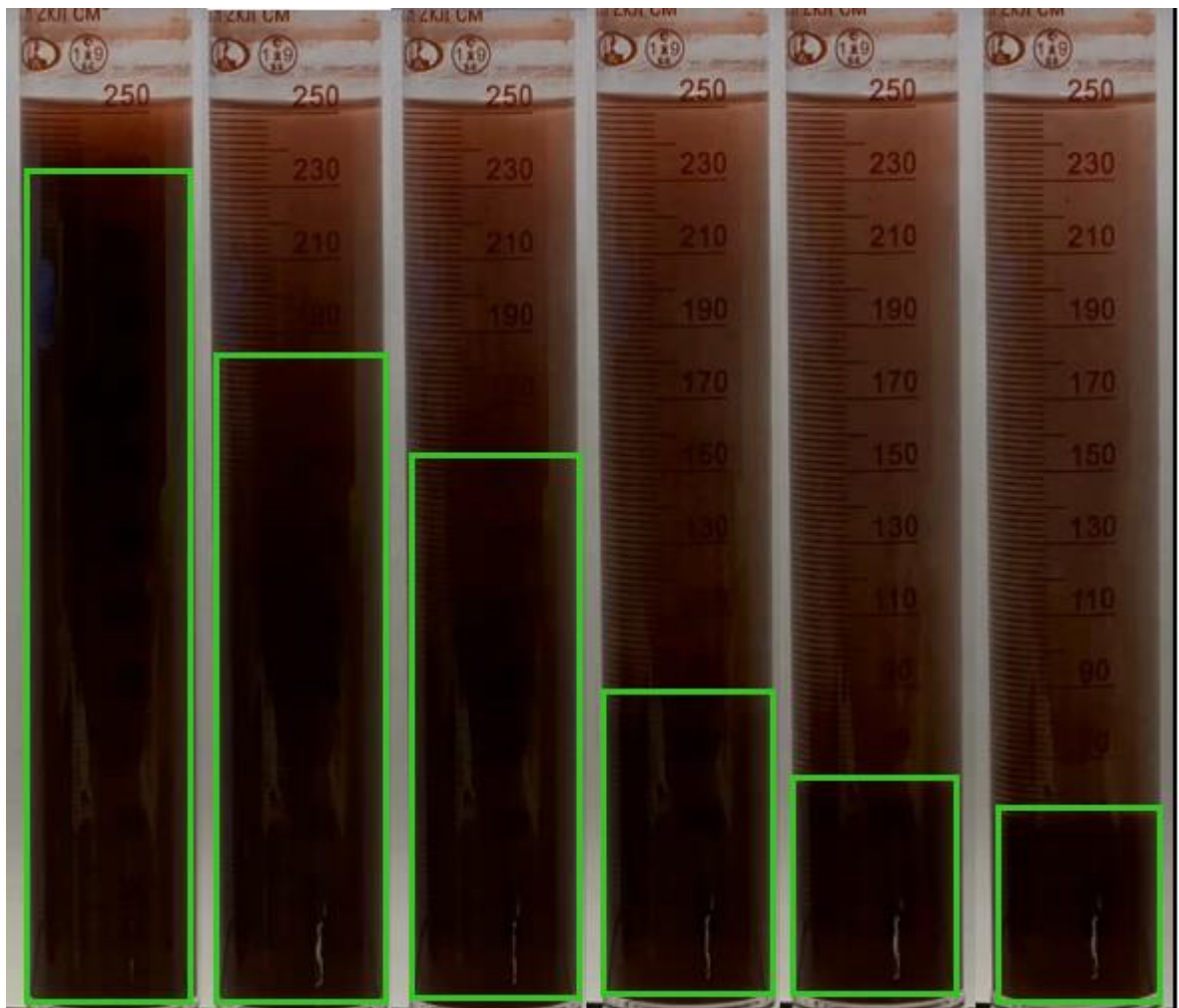


Рисунок 3.4 – Определение положения осажденной суспензии КШ. Материалы автора

Разработанная программа показала высокую точность в определении уровня жидкости в цилиндрах и скорости осаждения. Программа доказала свою эффективность, обеспечив:

Разработанная программа показала высокую точность в определении уровня жидкости в цилиндрах и скорости осаждения. Программа доказала свою эффективность, обеспечив:

1. Исключение ошибок, связанных с субъективным визуальным наблюдением;
2. Сокращение времени на обработку экспериментальных данных;
3. Повышение воспроизводимости результатов.

Этот инструмент может быть интегрирован в другие исследования, связанные с анализом процессов седиментации, обеспечивая точный и объективный подход к обработке данных. На основе последовательного анализа положения интерфейса строились графики изменения уровня жидкости во времени, которые представляли собой кривые осаждения. На рисунках 3.5 и 3.6 представлены кривые осаждения сфлуктурированной пульпы КШ при различных начальных концентрациях твердого вещества φ_0 для опытов в 5 одинаковых цилиндрах.

Поскольку обработка изображений и получение данных о скорости осаждения были получены в ходе работ кода на языке программирования python, было принято решение обработать результат также посредством данного языка программирования.

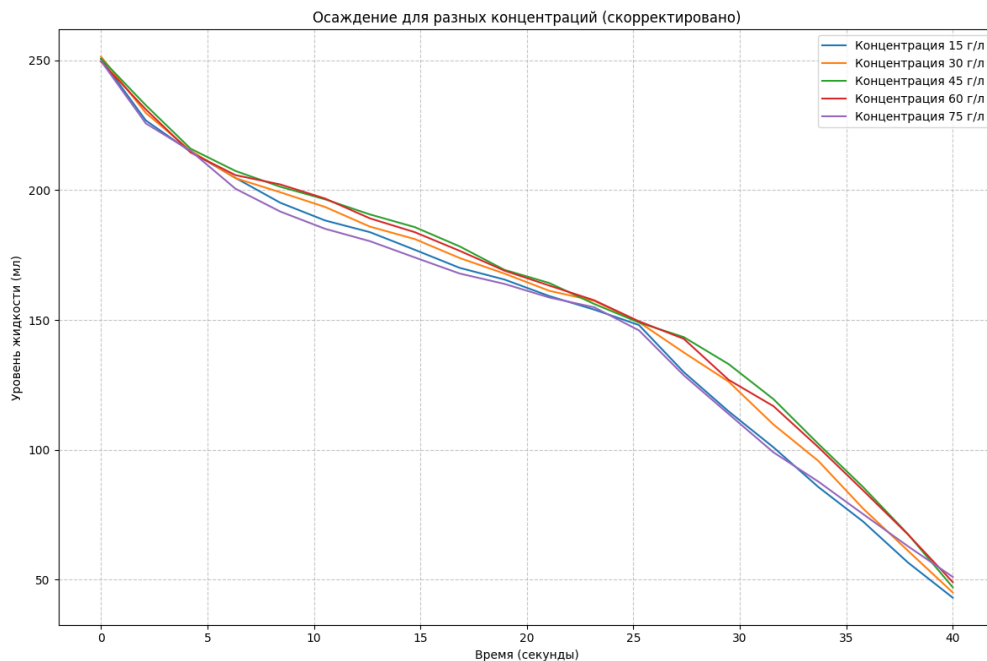


Рисунок 3.5 – Кривые осаждения флокулированной пульпы КШ при различных начальных концентрациях твердого вещества. Материалы автора

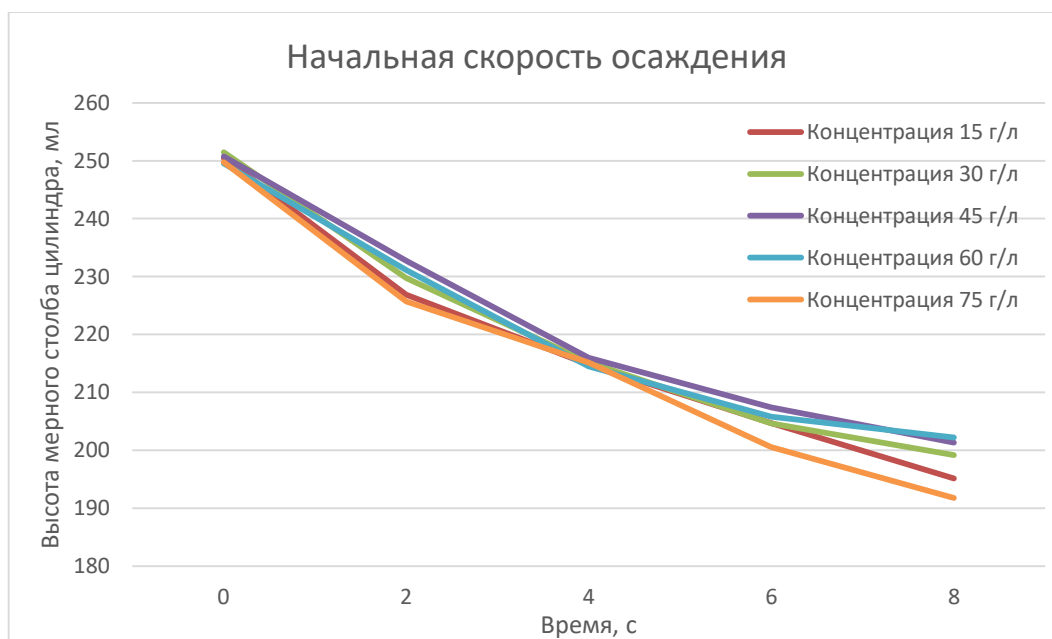


Рисунок 3.6 – Начальная скорость осаждения флокулированной пульпы КШ при различных начальных концентрациях твердого вещества. Материалы автора

Скорость Стокса (3.7) рассчитывалась для частицы размером 85 мкм, данное значение было получено в ходе лабораторного исследования размера флокул в главе 2. Индекс стесненного осаждения рассчитывается по уравнению (3). Рассчитывается n как наклон линии на логарифмическом графике зависимости $\ln(v)$ от $\ln(1 - \varphi)$ (рисунок 3.7)

Значение критической концентрации φ_c – это объемная доля, при которой частицы начинают взаимодействовать друг с другом. Обычно рассчитывается как (3.14):

$$\varphi_c = \frac{1}{n}, \quad (3.14)$$

где n – индекс стесненного осаждения, рассчитанный ранее.

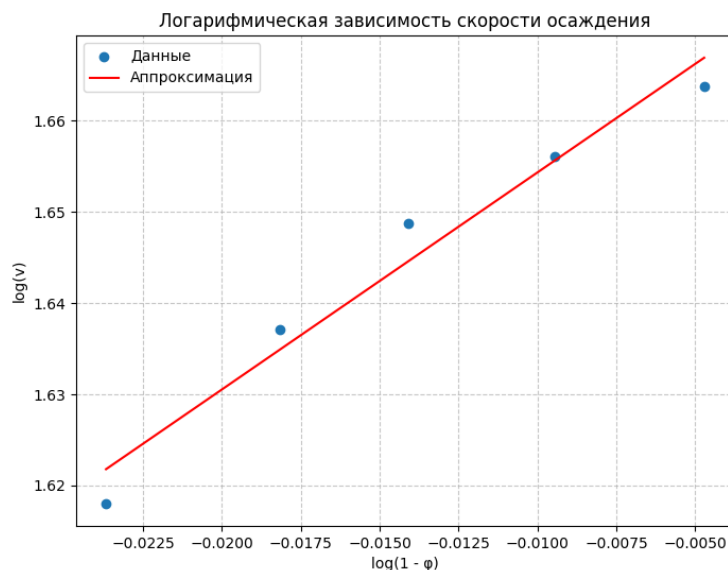


Рисунок 3.7 – Логарифмическая зависимость $\ln(v)$ от $\ln(1 - \varphi)$ для нахождения индекса стесненного осаждения n . Материалы автора

По результатам работы кода для обработки результатов лабораторного опыта, были получены следующие значения искомых коэффициентов (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Значения искомых параметров по результатам осаждения КШ в присутствии флокулянта

Скорость Стокса	27,78	м/ч
Индекс стесненного осаждения, n	2,37	-
Критическая концентрация, φ_c	0,42	Объемная доля %

3.5 Верификация результатов работы обобщенной модели промывателя

На рисунке 3.8 представлены результаты расчёта обобщенной модели промывателя, отражающие распределение концентрации твёрдого вещества (в объёмных долях) по высоте аппарата. Полученные данные демонстрируют характерное для процессов осаждения шлама снижение концентрации взвешенных частиц от нижней зоны к верхней, что согласуется с теоретическими представлениями о гравитационном разделении фаз. Особый интерес представляет нелинейный характер кривой, указывающий на влияние таких факторов, как скорость подачи пульпы, эффективность флокуляции и гидродинамические условия в аппарате.

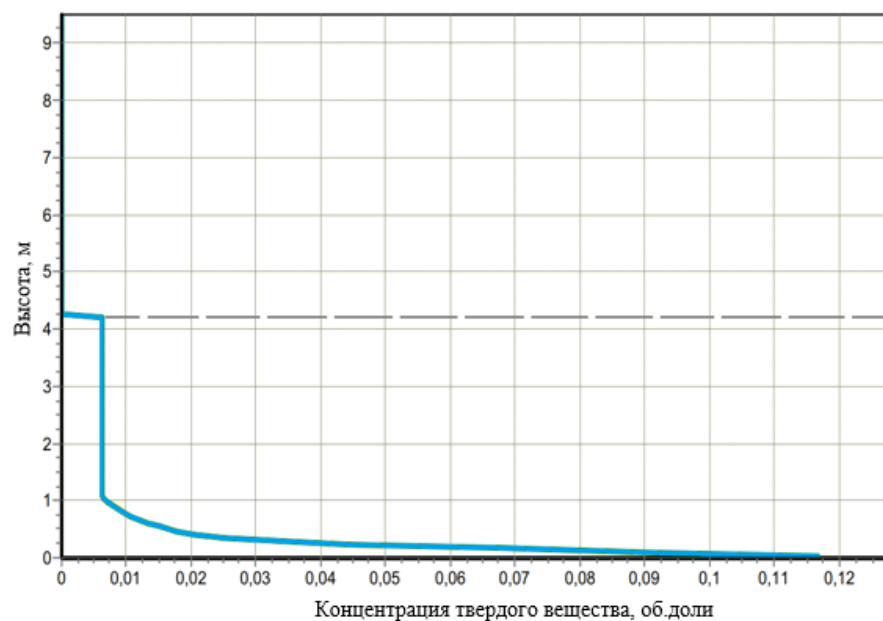


Рисунок 3.8 – Результат расчета обобщенной модели

Для анализа соотношения Ж/Т были отобраны пробы шлама из-под конусов 5 ступеней промывателей (рисунок 3.9). Данные о содержании твердой фазы передаются технологу участка 2 раза в сутки.



Рисунок 3.9 – Пробы шлама из-под 3 и 4 промывателя. Материалы по результатам производственной стажировки

Каждую отобранную пробу необходимо подготовить перед началом исследования. Пульпу из-под промывателя усредняли путем поочередного переливания из металлических кружек с заранее известным весом. Для опыта требовалось от 50 до 100 г пульпы. Усредненную

суспензию выливали на фильтр-систему вакуумной установки, состоящую из 2–3 бумажных фильтров и воронки, подключенной к насосу, создающему вакуум. Далее пульпу на фильтре промывали кипятком 4–5 раз до тех пор, пока реакция по фенолфталеину не станет отрицательной (рисунок 3.10).

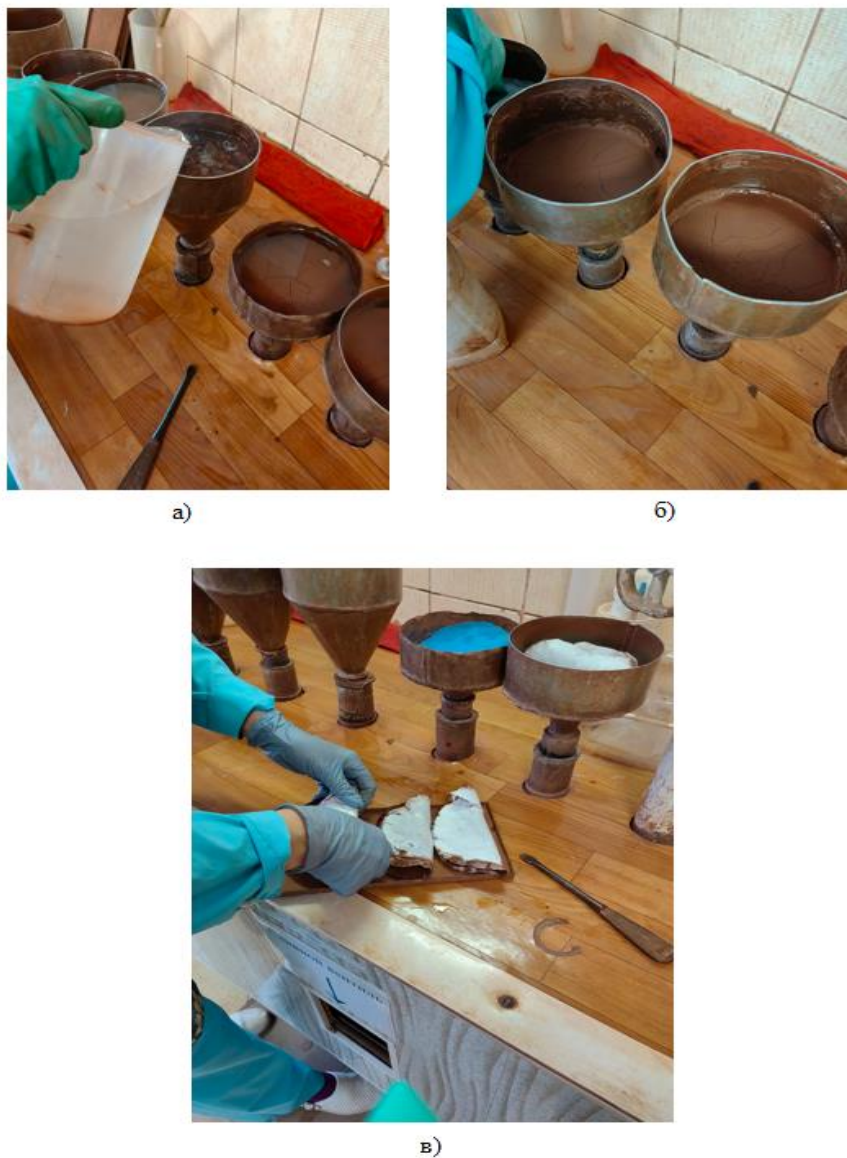


Рисунок 3.10 – Фильтр-система для подготовки шлама к сушке. Материалы по результатам производственной стажировки

Промытый шлам на фильтрах помещается в сушильный шкаф ЭКРОС ПЭ-4610 до полного высыхания при температуре $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 3.11). Полученные пробы взвешиваются и на основе полученной массы рассчитывается содержание твердой фракции, т.е. Ж/Т (таблица 3.3).



Рисунок 3.11 – Сушильный шкаф ЭКРОС ПЭ-4610 и осушенные пробы. Материалы по результатам производственной стажировки

Количество гтв/л (1000 см³) в пульпе рассчитывается по формуле (3.15):

$$\text{гтв/л} = m \cdot 1000 / V \text{ (г/дм}^3\text{)}, \quad (3.15)$$

где V – объем пробы, взятой на анализ, см³,

m – масса сухого остатка, г в нашем случае $m = m_2 - m_1$, г,

m_1 – масса фильтра, г (2,6гр),

m_2 – масса фильтра с осадком, г.

Таблица 3.3 – Масса проб из-под конуса сгустителя и промывателей соответственно

№ промывателя	0	1	2	3	4	5
m , г	34,9	30,2	33,3	32,0	31,5	53,6
гтв/л	323	376	307	294	289	510

Чтобы перейти от полученных значений к соотношению Ж/Т необходимо использовать следующие данные:

1. Содержание твердой фракции в пульпе (гтв/л): 510 г/л
2. Плотность жидкой фазы ($\rho_{\text{ж}}$): 1240 кг/м³ (или 1,24 г/см³)
3. Плотность твердой фракции ($\rho_{\text{т}}$): 3200 кг/м³ (или 3,2 г/см³)

Отобразим пример расчета для содержания 525 гтв/л. Переведем содержание твердой фракции в м³ (3.16):

$$V_m = \frac{m_{\text{т}}}{\rho_{\text{т}}} = \frac{525}{3200} = 0,159 = 0,000159 \text{ м}^3 \quad (3.16)$$

Рассчитаем объем жидкой фазы. Поскольку общее содержание пульпы равно 1 л (или 0.001 м³), то объем жидкой фазы будет (3.17):

$$V_{\text{ж}} = V - V_{\text{т}} = 1 \text{ л} - 0,159 \text{ л} = 0,841 \text{ л} = 0,000841 \text{ м}^3 \quad (3.18)$$

Рассчитаем массу жидкой фазы (3.19):

$$m_{\text{ж}} = V_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ж}} = 0,000841 \text{ м}^3 \cdot 1240 \text{ кг/м}^3 = 1,043 \text{ кг} \quad (3.19)$$

Теперь можем рассчитать соотношение Ж/Т (3.20):

$$\text{Ж/Т} = m_{\text{ж}} / m_{\text{т}} = 1,043 / 0,525 = 2,0 \quad (3.20)$$

Анализ данных, представленных в таблице 3.4, показывает, что расчетные значения соотношения Ж/Т в промывателях несколько выше экспериментально полученных данных. Среднее отклонение между расчетными и опытными значениями демонстрирует наличие систематической погрешности в используемой модели, что может быть связано с допущениями при расчетах или вариативностью технологических параметров. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,7$ свидетельствует о достаточно высокой степени корреляции между расчетными и опытными значениями. В целом, результаты подтверждают адекватность используемого подхода к расчету соотношения Ж/Т.

Таблица 3.4 – Сравнение результатов по определению соотношения Ж/Т

№ промывателя	1	2	3	4	5
Расчет модели Ж:Т	4,2	3,5	3,7	3,8	2,3
Эксперимент Ж:Т	3,7	3,4	3,5	3,6	2,0
R^2			0,7		

3.6 Разработка веб-интерфейса обобщенной модели промывателя

Современные информационные технологии предъявляют повышенные требования к эффективности инструментов, обеспечивающих управление математическими моделями и визуализацию результатов моделирования. В рамках данного исследования разработан специализированный веб-интерфейс, предназначенный для загрузки исходных данных, управления параметрами модели осаждения шлама и анализа результатов вычислительных экспериментов [91].

Разработанный веб-интерфейс реализован на основе клиент-серверной архитектуры, обеспечивающей необходимую гибкость, масштабируемость и независимость клиентской части от серверного программного обеспечения. Данная архитектура облегчает адаптацию интерфейса под различные исследовательские задачи и последующее расширение его функциональности.

Архитектура системы состоит из трёх основных компонентов:

1. Реляционная база данных MySQL используется для хранения входных параметров, результатов расчётов и настроек модели. Применение такой базы данных обусловлено её надёжностью, высоким быстродействием и возможностью выполнения сложных аналитических запросов. Структура базы данных была спроектирована с учётом минимизации избыточности информации и оптимизации производительности.

2. Серверная часть системы разработана с использованием высокопроизводительного асинхронного веб-фреймворка FastAPI. Сервер отвечает за обработку запросов от клиентской

части, осуществляет необходимые расчёты и операции с базой данных, возвращая пользователю результаты в виде структурированных JSON-объектов. Взаимодействие с базой данных осуществляется посредством ORM (Object-Relational Mapping) библиотеки SQLAlchemy, обеспечивающей целостность данных и упрощающей их обработку.

3. Клиентская часть реализована с использованием стандартных веб-технологий (HTML, CSS, JavaScript) и библиотеки React, обеспечивающей компонентный подход к разработке и высокую степень интерактивности интерфейса. Это позволяет пользователю эффективно взаимодействовать с системой через веб-браузер, осуществлять загрузку и настройку параметров модели, а также визуализировать результаты моделирования.

Важнейшим элементом веб-интерфейса является разработанный API, обеспечивающий обмен информацией между клиентской и серверной частями. В ходе проектирования были выделены основные функции, реализуемые через API: добавление и загрузка исходных данных, таких как концентрация твёрдой фазы, плотность и вязкость жидкости, расход флокулянта и геометрические параметры оборудования; получение результатов расчётов из базы данных в формате JSON для последующего анализа и обработки; управление существующими записями в базе данных, включая обновление и удаление данных, а также организацию доступа к ключевым параметрам модели.

Для обеспечения достоверности и корректности входных данных применялась библиотека Pydantic, выполняющая строгую валидацию данных на каждом этапе взаимодействия с системой. API было спроектировано с соблюдением принципов архитектуры REST (Representational State Transfer), что делает его интуитивно понятным и удобным для интеграции с другими информационными системами. Асинхронность обработки запросов обеспечивает высокую производительность системы даже в условиях интенсивной нагрузки. Для реализации хранения параметров модели в рамках исследования использовалась одна таблица базы данных, получившая название «constants». Таблица «constants» обеспечивает эффективное хранение и быстрый доступ к ключевым параметрам и результатам расчётов, что существенно упрощает управление процессами моделирования и их последующий анализ.

Пользовательский интерфейс был спроектирован с акцентом на интуитивную простоту, доступность и функциональность. Он позволяет взаимодействовать с моделью без необходимости обладания специализированными навыками в области программирования или работы с базами данных. Основные элементы интерфейса включают:

- форму загрузки исходных данных для модели;
- интерактивные компоненты для настройки параметров модели с возможностью предварительного просмотра результатов в режиме реального времени;

- средства визуализации результатов моделирования в виде интерактивных графиков и диаграмм, предоставляющих возможность изменения масштаба и выбора интересующих областей данных.

Использование React-компонентов позволило реализовать динамичный и отзывчивый интерфейс, способный легко масштабироваться и адаптироваться под различные исследовательские и производственные задачи (рисунок 3.12).

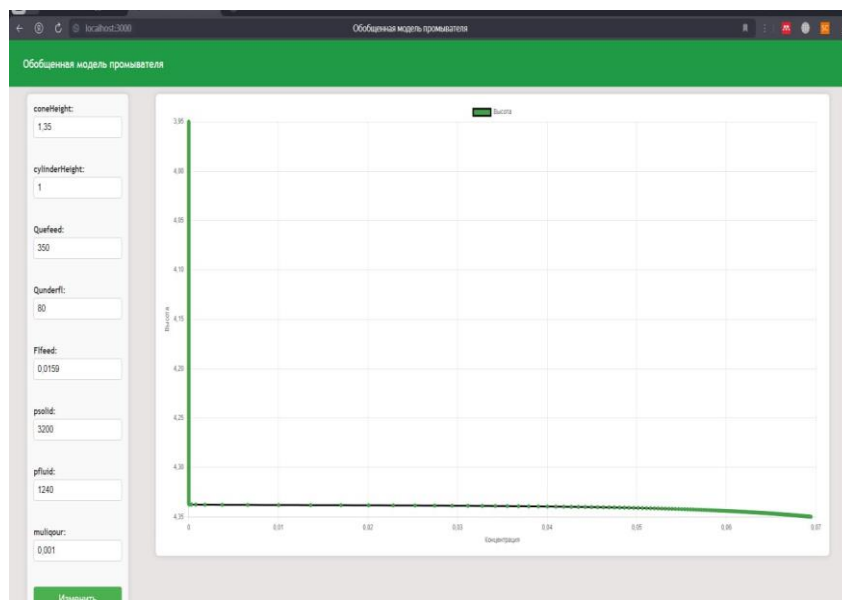


Рисунок 3.12 – Вид веб-интерфейса для расчета обобщенной модели промывателя. Материалы автора

Выводы к главе 3

В главе 3 представлена обобщённая математическая модель работы промывателя металлургической пульпы, включающая теоретические и экспериментальные аспекты процессов осаждения и уплотнения твердых частиц. Основное внимание уделено двум ключевым зонам осаждения: свободного и стеснённого, с акцентом на их математическое описание и физическую интерпретацию.

Разработанная модель базируется на известных уравнениях Стокса, Ричардсона-Заки и Терзаги, которые применяются для описания разных режимов течения и концентраций. Особое внимание уделено понятию критической концентрации, определяющей переход от режима свободного осаждения к стеснённому. Для пульпы с концентрацией выше критической зоны осаждение замедляется из-за гидродинамического взаимодействия частиц, что было подтверждено экспериментально. Эти явления были учтены при построении кривых осаждения и проведении расчетов.

Важным элементом работы стало внедрение экспериментальной методики определения скорости осаждения, основанной на автоматизированной обработке видеоданных. Данный

подход исключил субъективные ошибки и позволил с высокой точностью фиксировать уровень осаждения в цилиндрах. В рамках работы были использованы модели машинного обучения, такие как MobileNetV2, которые продемонстрировали высокую эффективность в обработке изображений и определении границ раздела фаз.

Полученные экспериментальные данные позволили рассчитать ключевые параметры, такие как скорость осаждения по закону Стокса, индекс стеснённого осаждения и критическую концентрацию. Эти параметры являются основой для проектирования обобщенной модели промывателя. Расчеты продемонстрировали высокую согласованность теоретических моделей с экспериментальными результатами, что подтверждает надежность разработанного подхода.

Практическая значимость работы заключается в том, что предложенная методика может быть интегрирована в промышленные системы управления процессами осаждения и уплотнения пульпы. Это обеспечивает более точное управление технологическими параметрами, повышение производительности оборудования и снижение эксплуатационных затрат.

Таблица 4.1 – Технологические параметры режима работы узла промывки

Параметр	Значение	Единица измерения
Температура пульпы в сгустителях	93-98	°С
Температура в системе промывки	зависит от количества автоклавных батарей	°С
Отношение Ж/Т в сгущенном продукте	менее 2.5	ед
Отношение Ж/Т в отвальном шламе	менее 3.0	ед.
Высота осветленных зон на сгущении и промывке	3000	мм
Концентрация Na ₂ O в промводе 1-го ряда	35-65	г/л
Содержание Na ₂ O в жидкой части отвального шлама	2,0-6,5	г/л
Концентрация раствора флокулянтов на промывку	0,05+0,15	%

Дозирование «рабочего» раствора флокулянта ведется согласно рекомендациям фирмы производителя в два приема. Первая добавка флокулянта к пульпе красного шлама производится в питающий трубопровод и контролирует чистоту слива. Вторая добавка флокулянта производится в питающий стакан аппарата и позволяет контролировать скорость осаждения и уплотнение шлама [45; 48].

4.1 Разработка подмодели расчета содержания NaOH

4.1.1. Обзор существующих методов расчета

Модель баланса масс является основным инструментом для описания процессов противоточной декантации. Она основывается на законах сохранения массы и широко используется для оценки концентраций растворённых веществ и твёрдых частиц на каждой стадии противоточной промывки.

Предполагается, что поток поступающей суспензии (твёрдая фаза и жидкость) и поток добавляемой промывной жидкости смешиваются перед разделением (4.1).

$$F_n C_n = F_{n+1} C_{n+1} + Q_n C_{w,n}, \quad (4.1)$$

где F_n – общий поток суспензии на n-й стадии,

C_n – концентрация твёрдых веществ в суспензии,

Q_n – поток жидкости, отводимой в виде фильтрата,

$C_{w,n}$ – концентрация растворенного вещества в жидкой фазе.

Баланс жидкой фазы учитывает количество растворенных веществ, переносимых в жидкости на каждой стадии, и часто записывается с учетом уравнений диффузии, если происходит перенос между фазами.

Для определения минимального числа стадий, необходимых для достижения заданного качества промывки, часто используется уравнение Кричевского-Карлайл (Kremsky-Carlile Equation), которое выражает соотношение между концентрациями растворенного вещества на различных стадиях, характеристиками потоков, а также эффективностью извлечения. В основе модели лежит закон противоточного равновесия (4.2):

$$C_{n+1} = C_n R, \quad (4.2)$$

где C_n – концентрация на n -й стадии,

R – коэффициент переноса растворенного вещества между стадиями.

Данное уравнение может быть интегрировано для получения общего числа стадий N (4.3):

$$N = \frac{\ln(C_1/C_N)}{\ln(R)}, \quad (4.3)$$

где C_1 – начальная концентрация на первой стадии,

C_N – концентрация на последней стадии,

R – эффективность переноса растворенного вещества.

Промывка зависит от расхода свежей воды W , который распределяется по стадиям (4.4):

$$W = \frac{F}{\eta}, \quad (4.4)$$

где F – общий расход суспензии,

η – эффективность промывки, характеризующая способность разделения растворенного вещества от твердых частиц.

Концентрация растворённого вещества на последней стадии C_n в системе из n стадий противоточной промывки может быть вычислена по формуле (4.5):

$$C_n = \frac{C_l - C_w}{1 + WR + WR^2 + \dots + WR^n}, \quad (4.5)$$

где C_l – концентрация в исходной пульпе,

C_w – концентрация в промывной воде;

WR – коэффициент промывки, определяемый как отношение расхода промывной воды к расходу жидкости в пульпе.

В статье [58] подробно рассматривает процесс противоточной декантации (CCD) в медной металлургии, предлагая математические модели для описания масс и объемов твёрдой и жидкой фаз пульпы. Автор характеризует пульпу через массу, объём и удельный вес её компонентов, устанавливая взаимосвязи между этими параметрами. Уравнение эффективности промывки представлено как (4.6):

$$Tu_p WEk = \frac{(To_1 VL (To_1 Ck - To_{p+1} Ck))}{(Tu_0 VL (Tu_0 Ck - To_{p+1} Ck))} \times 100\% , \quad (4.6)$$

где $Tu_p WEk$ эффективность промывки на p -й стадии декантации для элемента k (например, примеси, соли, металла). Это показатель того, насколько эффективно удаляется k -й компонент с осветлителя p ,

$To_1 VL$ – объём жидкости (либо промывного раствора), подаваемой на вход в первую стадию промывки,

$To_1 Ck$ – концентрация компонента k в жидкости, выходящей с первой стадии осветлителя,

$To_{p+1} Ck$ – концентрация компонента k в жидкости, выходящей с осветлителя $p+1$. Показывает остаточную концентрацию k после прохождения нескольких стадий,

$Tu_0 VL$ – объём жидкости, содержащей примесь k , которая поступает в систему промывки (например, с питательной пульпой).

$Tu_0 Ck$ – концентрация компонента k в исходной жидкости (питательной пульпе), поступающей на вход системы противоточной промывки. Это исходная концентрация примеси или загрязнителя.

Немаловажным аспектом является то, что автор включает поток флокулянта в расчет своей модели, как правило из-за незначительного объема подаваемого материала к основному потоку обрабатываемого шлама данный параметр не учитывается в расчетах.

4.1.2. Математическая подмодель расчета содержания NaOH

Математическая модель процесса противоточной промывки позволяет оптимизировать его параметры и оценивать эффективность для каждого этапа.

Классическое уравнение для расчёта противоточной промывки красного шлама основано на массовом балансе для твёрдой и жидкой фаз [6]. Оно учитывает взаимодействие потоков пульпы и промывной воды на каждой стадии промывки и снижение концентрации загрязняющих веществ, таких как щёлочь, в процессе [63].

Для расчёта концентрации загрязняющих веществ (например, NaOH) на каждой стадии используется следующая формула (4.7):

$$C_{i+1} = \frac{Q_{pulp,i} C_i + Q_{water,i} C_{water,i}}{Q_{pulp,i} + Q_{water,i}}, \quad (4.7)$$

где C_i – концентрация загрязняющего вещества на стадии i (г/л),

C_{i+1} – концентрация загрязняющего вещества на следующей $(i+1)$ стадии, г/л,

$Q_{pulp,i}$ – расход пульпы, поступающей на i -ю стадию, м³/ч

$Q_{water,i}$ – расход промывной воды на i -й стадии, м³/ч

$C_{water,i}$ – концентрация загрязняющего вещества в промывной воде, г/л.

Для расчёта концентрации загрязняющих веществ (например, NaOH) на каждой стадии используется следующая формула (4.8):

$$C_{i+1} = \frac{Q_{pulp,i}C_i + Q_{water,i}C_{water,i}}{Q_{pulp,i} + Q_{water,i}}, \quad (4.8)$$

где C_i – концентрация загрязняющего вещества на стадии i (г/л),

C_{i+1} – концентрация загрязняющего вещества на следующей ($i+1$) стадии, г/л,

$Q_{pulp,i}$ – расход пульпы, поступающей на i -ю стадию, м³/ч

$Q_{water,i}$ – расход промывной воды на i -й стадии, м³/ч

$C_{water,i}$ – концентрация загрязняющего вещества в промывной воде, г/л.

Массовый баланс твёрдой фазы и жидкости на i -й стадии описывается уравнением (4.9):

$$Q_{pulp,i} + Q_{water,i} = Q_{pulp,i+1}, \quad (4.9)$$

где $Q_{pulp,i+1}$ – расход пульпы, выходящей с стадии i , м³/ч.

Эффективность промывки на каждой стадии рассчитывается как (4.10):

$$E_i = 1 - \frac{C_{i+1}}{C_i}, \quad (4.10)$$

где E_i – эффективность промывки на стадии i (в долях от 1).

Для оценки общей эффективности промывки через n стадий используется обобщённое уравнение (4.11):

$$C_{out} = C_{in} \cdot \prod_{i=1}^n (1 - E_i), \quad (4.11)$$

где C_{out} – концентрация загрязняющего вещества на выходе из последней стадии, г/л,

C_{in} – начальная концентрация загрязняющего вещества, г/л.

Если на входе в первую стадию подаётся пульпа с расходом $Q_{pulp,1}$ и концентрацией загрязняющего вещества C_1 , а также промывная вода с расходом $Q_{water,1}$ и $C_{water,1} \approx 0$, то концентрация загрязняющего вещества на выходе из первой стадии будет рассчитана как (4.12):

$$C_2 = \frac{Q_{pulp,1}C_1}{Q_{pulp,1} + Q_{water,1}} \quad (4.12)$$

Для следующих стадий процесс повторяется с использованием выходных значений предыдущей стадии в качестве входных для следующей.

Основное изменение заключается в добавлении расхода флокулянта ($Q_{floc,i}$) в общий поток жидкости (4.13):

$$C_{i+1} = \frac{Q_{pulp,i}C_i + Q_{water,i}C_{water,i} + Q_{floc,i}C_{floc}}{Q_{pulp,i} + Q_{water,i} + Q_{floc,i}}, \quad (4.13)$$

где C_i – концентрация загрязняющего вещества на стадии i , г/л,

C_{i+1} – концентрация загрязняющего вещества на выходе стадии i , г/л,

$C_{water,i}$ – концентрация загрязняющего вещества в промывной воде, г/л,

C_{floc} – концентрация загрязняющего вещества во флокулянте, г/л,

$Q_{pulp,i}$ – расход пульпы на стадии i , м³/ч,

$Q_{water,i}$ – расход промывной воды на стадии i , м³/ч,

$Q_{floc,i}$ – расход флокулянта на стадии i , м³/ч.

Общий расход жидкости на стадии $i+1$ ($Q_{liq,i+1}$) учитывает добавление флокулянта (4.14):

$$Q_{liq,i+1} = Q_{pulp,i} + Q_{water,i} + Q_{floc,i}, \quad (4.14)$$

На первой стадии промывки ($i=1$) уравнение будет выглядеть следующим образом (4.15):

$$C_2 = \frac{Q_{pulp,1}C_1 + Q_{water,1}C_{water,1} + Q_{floc,1}C_{floc}}{Q_{pulp,1} + Q_{water,1} + Q_{floc,1}}, \quad (4.15)$$

Для последующих стадий уравнение сохраняет ту же форму, с обновлением концентрации C_{i+1} и входных параметров для каждой стадии.

Входные параметры:

1. Расходы пульпы, воды и флокулянта на каждой стадии;
2. Концентрации щелочи в промывной воде и флокулянте;
3. Начальная концентрация щелочи в промываемой пульпе КШ.

На каждой стадии общий расход жидкости Q_{total} складывается из расходов пульпы, воды и флокулянта. Результат расчета приведен на рисунке 4.2.

Расчёт промывки красного шлама

Количество стадий промывки:	5
Расход пульпы (м ³ /ч, через запятую):	350,331,342,345,338
Расход промывной воды (м ³ /ч):	423
Расход флокулянта (м ³ /ч, через запятую):	35,40,42,41,38
Начальная концентрация щелочи в пульпе (г/л):	60
Концентрация щелочи в промывной воде (г/л):	2
Концентрация щелочи во флокулянте (г/л):	0.5

Рассчитать и построить график

Стадия 1: 27.06 г/л
 Стадия 2: 12.37 г/л
 Стадия 3: 6.32 г/л
 Стадия 4: 3.76 г/л
 Стадия 5: 2.68 г/л

Рисунок 4.2 – Результат расчета содержания NaOH в математической подмодели

4.3. Верификация подмодели расчета содержания NaOH

В ходе верификации лабораторного эксперимента проводилось исследование состава осветленного раствора, полученного из пульпы промывателей, с целью определения содержания химических компонентов. На первом этапе осуществлялся отбор проб осветленного раствора, который затем подвергался дальнейшей обработке для подготовки к аналитическим измерениям. Для минимизации возможных погрешностей и обеспечения репрезентативности исследования

использовалась унифицированная методика пробоотбора, позволяющая сохранить исходные характеристики раствора (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Отбор проб противоточной воды каждого промывателя

После отбора проб проводилась их подготовка к анализу с использованием автоматического титратора Mettler Toledo T5 (рисунок 4.4). Для этого каждая проба объемом 5 мл разбавлялась 35 мл дистиллированной воды, что обеспечивало снижение концентрации и предотвращало возможное влияние матричных эффектов. Разведение пробы позволяло достичь необходимой точности при титриметрическом анализе, а также обеспечить корректное протекание химической реакции во время титрования. Использование автоматического титратора гарантировало высокую степень воспроизводимости измерений, снижая субъективные ошибки, характерные для ручных методов.



Рисунок 4.4 – Определение содержания щелочи в промывной воде методом титрования Mettler Toledo T5

Титрование проб проводилось с применением HCl 0,5 N, в ходе которого фиксировались объемы израсходованного титранта. Полученные данные анализировались для расчета концентрации определяемой щелочи, что позволило оценить степень промывки пульпы в промывателях.

Анализ данных, представленных в таблице 4.2, показывает высокую степень согласования между расчетными и экспериментальными значениями содержания NaOH в промывной воде, что подтверждается значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,9$. Незначительные отклонения в отдельных точках могут быть обусловлены вариативностью технологического процесса, влиянием внешних факторов или погрешностями измерений. В целом, представленная модель демонстрирует высокую точность прогноза и может быть эффективно использована для оценки содержания щелочи на различных стадиях промывки.

Таблица 4.2 – Сравнение результатов по определению содержания щелочи в промывной воде

№	1	2	3	4	5
Расчет модели NaOH , г/л	27,1	12,4	6,3	3,8	2,7
Эксперимент NaOH , г/л	24,2	11,7	6,2	4,1	2,1
R^2	0,9				

4.2 Интеграция модулей прогнозной модели промывки в СУУ ТП противоточной промывки

Мягкие датчики в системах СУУ ТП представляют собой виртуальные инструменты, использующие математические модели, алгоритмы машинного обучения или комбинации этих подходов для оценки параметров процесса, которые трудно или невозможно измерить напрямую. В отличие от традиционных физических датчиков, мягкие датчики основываются на корреляциях между измеряемыми входными параметрами и целевыми переменными, что делает их особенно полезными в сложных промышленных системах. Основное преимущество программно-управляемых датчиков заключается в их гибкости: они способны адаптироваться к изменениям технологического процесса, корректировать свои алгоритмы работы и взаимодействовать с верхнеуровневыми системами управления, включая SCADA и MES. В процессе осаждения невозможно непосредственно измерить размер флоккул или степень агрегации частиц [54]. Мягкий датчик, основанный на МПБ, оценивает эти параметры по данным о дозировке флокулянта, скорости потока и концентрации твердых частиц, что подробно описано в главе 2.

Для интеграции мягкого датчика в АСУ ТП требуется дополнительный уровень, который включает предиктивное управление. Этот уровень состоит из мягких датчиков, прогнозных моделей и регуляторов, которые обрабатывают данные и формируют управляющие воздействия.

Таким образом, система управления преобразуется из классической каскадной в более сложную многослойную структуру, включающую:

1. Физический уровень, где осуществляется сбор данных с первичных физических датчиков.
2. Цифровой уровень, где вычисляется размер флокул с помощью мягкого датчика.
3. Прогнозный уровень, где обобщённая модель промывателя рассчитывает Ж/Т.
4. Уровень управления, где полученные данные используются для адаптивной настройки параметров процесса.
5. Уровень визуализации, отображающий измеренные и прогнозные данные, а также ключевые показатели эффективности для оператора.

Вся структура модернизированной СУУ ТП построена на взаимодействии её компонентов через информационные потоки:

1. Физические датчики измеряют параметры процесса и передают данные в систему.
2. Мягкий датчик обрабатывает данные и вычисляет средний размер флокул.
3. Прогнозная модель принимает данные от мягкого датчика и прогнозирует Ж/Т.
4. Контур управления использует прогнозные данные для формирования управляющих воздействий.
5. Исполнительные механизмы изменяют параметры процесса, что снова фиксируется физическими датчиками, замыкая цикл управления.

Преимущества подобных контуров управления заключаются в их способности стабилизировать процесс за счет автоматической адаптации к изменяющимся условиям, минимизируя колебания параметров процесса и снижая потребление реагентов. Использование прогнозных моделей и мягких датчиков позволяет учитывать нелинейные зависимости, что особенно важно для сложных промышленных систем. Кроме того, возможность интеграции с системами верхнего уровня, такими как SCADA и MES, улучшает контроль и анализ данных [20].

Однако существуют и недостатки. Во-первых, точность работы таких контуров зависит от корректности модели, используемой для прогнозирования параметров. Ошибки в настройке или калибровке датчиков могут приводить к нежелательным отклонениям в управлении. Во-вторых, реализация подобных систем требует значительных вычислительных ресурсов, а также высокой квалификации персонала для настройки и обслуживания. В условиях сильных возмущений, таких как резкие изменения состава пульпы, модель может не успевать корректировать параметры, что требует дополнительной адаптации системы.

Предлагаемый контур управления расходом флокулянта с использованием прогнозной модели противоточной промывки и мягкого датчика представлен на рисунке 4.5.

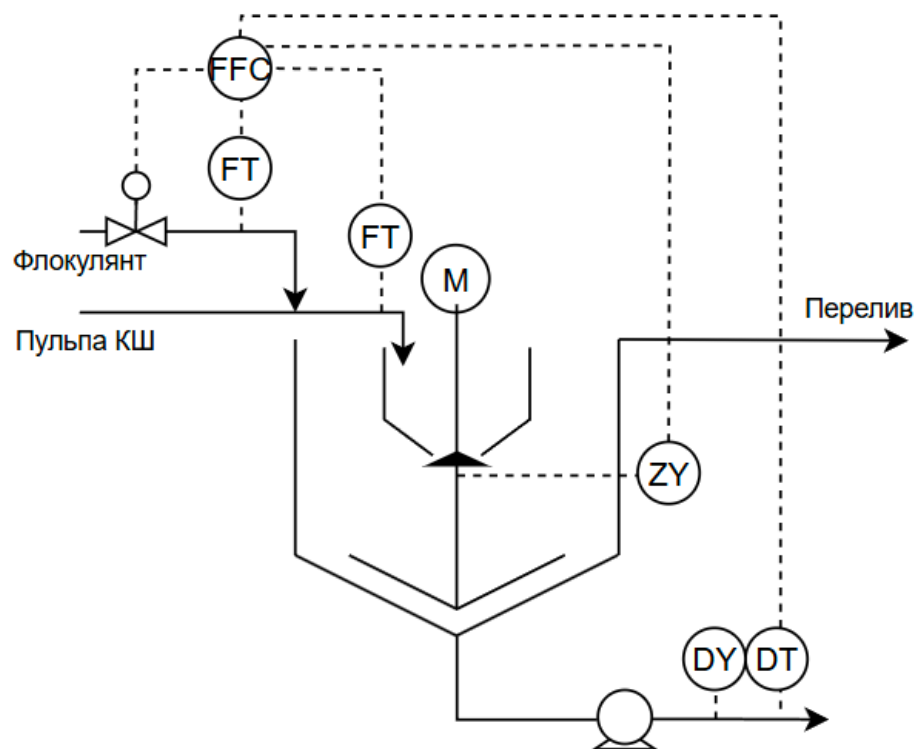


Рисунок 4.5 – Предлагаемое управление расходом флокулянта в промывателе

Использование прогнозных контуров управления на основе математических моделей и мягких датчиков позволяет повысить эффективность процесса промывки, обеспечивая соотношение расхода реагентов, плотности пульпы и конечных характеристик процесса. Оценка среднего размера флокул из-под питающего стакана промывателя позволит регулировать дозировку флокулянта, что предотвратит его перерасход и улучшит эффективность процесса осаждения. Это позволяет достичь следующих преимуществ: сокращение потерь реагентов за счёт точной дозировки флокулянта, которая основана на реальных данных о состоянии процесса; повышение устойчивости системы к внешним и внутренним возмущениям за счёт предиктивного управления.

Программно-управляемый датчик играет роль интеллектуального посредника между физическими процессами и прогнозной моделью. Прогнозная модель, в свою очередь, влияет на контуры управления. Для обеспечения надёжного взаимодействия между компонентами системы данные о размере флокул передаются через цифровую шину, а расчёт Ж/Т интегрируется в систему управления в реальном времени.

Одним из ключевых преимуществ интеграции является адаптивность системы. В условиях непостоянства потока пульпы на входе модули позволяют оперативно корректировать работу системы, снижая вероятность сбоев. Например, прогнозная модель способна предсказывать необходимость увеличения или уменьшения подачи флокулянта в зависимости от изменений

состава пульпы или её расхода. Это не только повышает стабильность процесса, но и снижает затраты на реагенты.

На рисунке 4.6 отображена структура модернизированной системы управления и оптимизации управления технологическими процессами (СУУ ТП) для противоточной промывки красного шлама. В центре схемы расположена прогнозная модель противоточной промывки, которая включает две основные части: обобщенную модель промывателя и подмодель расчета содержания NaOH из-под конусов промывателей. Каждая из них оперирует набором входных параметров, на основе которых выполняются вычисления.

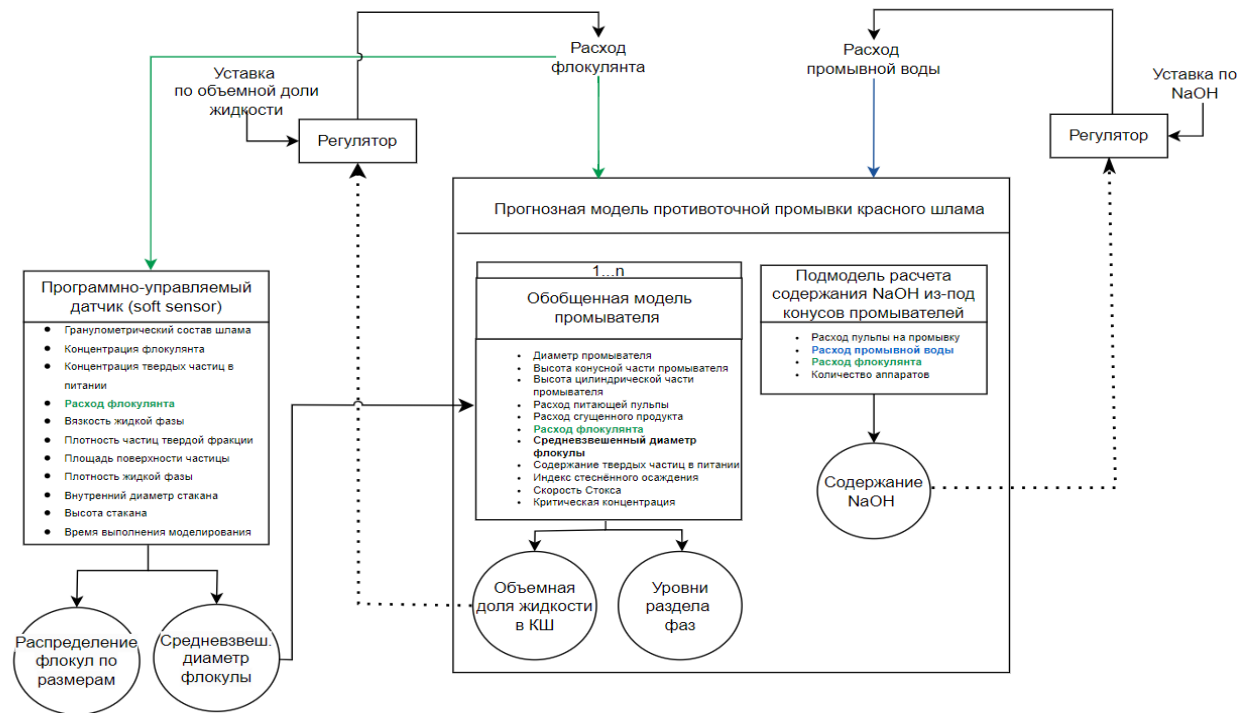


Рисунок 4.6 – Схема взаимосвязи модулей СУУ ТП: программно-управляемого датчика (soft sensor), обобщенных моделей промывателей ($n = 5$) и подмодели расчета содержания NaOH в составе прогнозной модели противоточной промывки

Обобщенная модель промывателя учитывает параметры аппарата, такие как диаметр, высота конусной части, площадь поперечного сечения, расход пульпы, промывной воды и флокулянта, а также характеристики твердых частиц, включая их содержание, скорость осаждения и критическую концентрацию. В результате расчетов определяются объемная доля жидкости в красном шламе и уровни раздела фаз. Подмодель расчета содержания NaOH в жидкости под конусами промывателей использует данные о расходах пульпы, промывной воды, флокулянта и количестве аппаратов, результатом ее работы является вычисленное содержание NaOH. Представленная система управления объединяет прогнозную модель, программно-управляемые датчики и адаптивные регуляторы, обеспечивая автоматизированное управление процессом промывки красного шлама.

Прогнозная модель противоточной промывки выполняет расчёт концентрации щелочи, содержания твёрдой фракции и соотношения Ж/Т на каждом этапе промывки. Основываясь на математических моделях, она предсказывает параметры выхода, что позволяет точно регулировать подачу флокулянта и воды для достижения оптимальных условий промывки. Первый регулятор управляет расходом флокулянта, используя установку по объемной доле жидкости, а второй регулирует расход промывной воды, основываясь на содержании NaOH. Связи между элементами системы представлены сплошными линиями, обозначающими потоки данных и материалов, и пунктирными линиями, указывающими на информационные связи.

4.3 Верификация СУУ ТП противоточной промывки красного шлама глиноземного производства

4.3.1 Подготовка архивных данных процесса противоточной промывки

Для анализа качества работы модели необходим репрезентативный временной интервал 2 недели из архива производственных данных (таблица 4.3), в течение которого технологические параметры процесса промывки КШ находились в относительно стабильных условиях. Архивные данные исследуемого предприятия были получены в ходе производственной стажировки (рисунок 4.7, рисунок 4.8).

Для оценки прогнозной модели противоточной промывки КШ в СУ процесса противоточной промывки требуется подключение прогнозной модели к программному пакету Proficy CSense Architect (рисунок 4.9). Поскольку прогнозная модель и программно-управляемый датчик реализованы на языке программирования Python, удобным методом настройки связи является организация REST-сервиса. Данные, передаваемые из Proficy, представлены в виде CSV-файла, поэтому REST-сервис, реализованный с помощью фреймворка FastAPI, должен быть адаптирован для корректной обработки файлового ввода.

Таблица 4.3 – Архивные параметры процесса противоточной промывки

Параметр	Диапазон	Ед. измерения	Модель флокуляции	Модель промывателя	Модель промывки
Входные параметры					
Расход флокулянта	0-1000	л/ч			
Расход горячей воды на промывку	0-630	м3/ч			
Защелоченность горячей воды	0-15	г/л			
Расход пульпы в промыватель №1.	0-250	м3/ч			
Расход пульпы в промыватель №2.	0-400	м3/ч			
Расход пульпы в промыватель №3.	0-400	м3/ч			
Расход пульпы в промыватель №4.	0-400	м3/ч			
Расход пульпы в промыватель №5.	0-400	м3/ч			
Расход шлама из-под конуса промывателя №1	0-400	м3/ч			
Расход шлама из-под конуса промывателя №2	0-400	м3/ч			
Расход шлама из-под конуса промывателя №3	0-400	м3/ч			
Расход шлама из-под конуса промывателя №4	0-400	м3/ч			
Расход шлама из-под конуса промывателя №5	0-400	м3/ч			
Выходные параметры					
Плотность шлама из-под конуса промывателя №1	1150-1350	кг/м3			
Плотность шлама из-под конуса промывателя №2	1150-1350	кг/м3			
Плотность шлама из-под конуса промывателя №3	1150-1350	кг/м3			
Плотность шлама из-под конуса промывателя №4	1150-1350	кг/м3			
Плотность шлама из-под конуса промывателя №5	1400-1600	кг/м3			
Защелоченность отвального шлама	0-10	г/л			

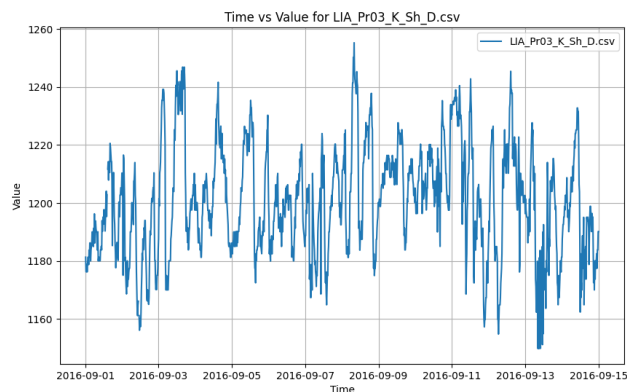


Рисунок 4.7 – Плотность шлама из-под промывателя №3

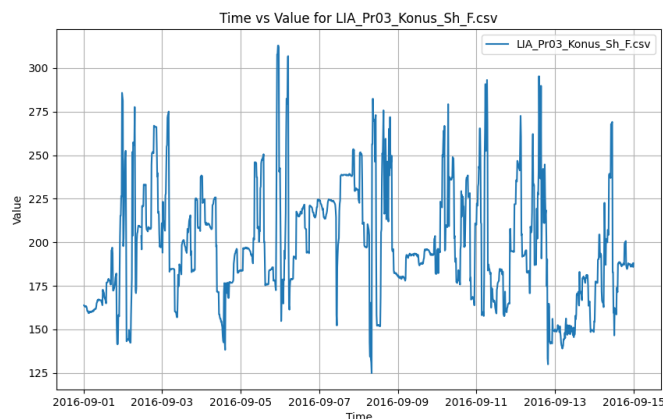


Рисунок 4.8 – Расход шлама из-под промывателя №3

4.3.2 Оценка работы прогнозной модели в системе управления

Вместо получения структурированного JSON-объекта, сервис принимает файл, считывает и преобразует данные в пригодный для анализа формат и выполняет необходимые вычисления [85].

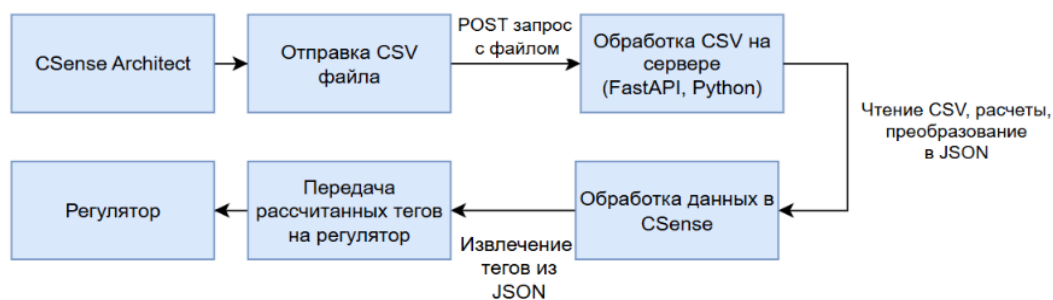


Рисунок 4.9 – Блок-схема этапов передачи данных между Proficy Csense Architect и прогнозной моделью на Python

Предварительная обработка архивных данных процесса осуществляется встроенными средствами CSense Troubleshooter. В реальных архивах у разных тегов замеры могут происходить с разными интервалами и временными метками. Средствами CSense осуществляется приведение данных к единой временной сетке путём интерполированной выборки с заданным шагом

времени (15 минут), что позволяет эффективно анализировать корреляции и обучать модели. Очистка выбросов проводится с помощью операции ограничения значений (Limit Values), где пользователь задаёт допустимый диапазон для каждого параметра, а точки вне диапазона помечаются или заменяются. Дополнительно для выявления выбросов используются статистические методы фильтрации. Для устранения пробелов во временных рядах применяется интерполяция, например, линейная или более сложная сплайновая интерполяция. Такой комплекс предварительной обработки обеспечивает высокое качество исходных данных, что критически важно для работы прогнозной модели и динамического сопоставления её результатов с реальными показателями процесса. Также Troubleshooter предоставляет средства сглаживания шумов (например, скользящее среднее, медианный фильтр), нормализации (отклонение и тренд часто удаляют), объединения нескольких источников (join по времени), расчёта новых признаков. Все эти шаги проводятся в модуле Data Preparation перед анализом, обеспечивая качественную подготовку данных.

В среде GE Proficy CSense Architect реализован вычислительный блок на VB.NET, который формирует POST-запросы к REST-серверу прогнозной модели, обрабатывает возвращаемые результаты и интегрирует их обратно в поток данных системы управления в виде виртуальных тегов. Важно указать полный URL адрес конечной точки API (например, «http://hostname:port/endpoint»), поскольку именно этот адрес определяет путь, по которому осуществляется обращение к модели. Выбор HTTP-метода (обычно POST или GET) также напрямую влияет на способ формирования запроса и последующую обработку данных.

Функции регуляторов в системе управления выполняет блок нелинейной оптимизации (Nonlinear Optimization), входящий в состав GE Proficy CSense Architect. Данный блок решает задачу нелинейного программирования путем минимизации или максимизации целевой функции при учете множества наложенных ограничений. Используемые методы оптимизации включают последовательное квадратичное программирование (SQP), методы внутренней точки, генерализованный приведённый градиент (GRG) и гибридные эволюционные алгоритмы, позволяющие эффективно работать с нелинейными задачами и задачами, имеющими несколько локальных экстремумов. Целевая функция и ограничения могут иметь сложную нелинейную структуру, что существенно расширяет возможности системы управления в сравнении с традиционными ПИ и ПИД-регуляторами.

В рассматриваемом случае блок нелинейной оптимизации функционирует следующим образом: он получает текущие и прогнозируемые данные о состоянии процесса противоточной промывки, в частности, прогнозируемое значение плотности пульпы из-под первого промывателя (DPrlm). Целевая функция оптимизации формулируется как минимизация

абсолютного отклонения текущего прогнозируемого значения от заданной уставки плотности ($SP = 1275 \text{ кг/м}^3$).

При этом в качестве управляющих переменных выступают расход промывной воды и флокулянта. Блок итеративно корректирует эти переменные, применяя методы SQP, внутренней точки и GRG, для поиска оптимального набора параметров, минимизирующих целевую функцию с соблюдением всех заданных технологических ограничений. Эти методы позволяют последовательно находить оптимальные решения путём решения квадратичных аппроксимаций исходной задачи, эффективно обрабатывая многомерные нелинейные задачи с многочисленными ограничениями.

Во вкладке constraints блока нелинейной оптимизации заданы управляющие воздействия и ограничения их изменений. Грубое ограничение управляющих воздействий в виде high-high и low-low ограничений дает резкие колебания управляющих воздействий, что недопустимо при управлении реальным объектом. Выход из этой ситуации – задание подвижных ограничений управляющих воздействий, т.е. при изменении управляющего воздействия задается своего рода «коридор» его возможного изменения (рисунок 4.10).

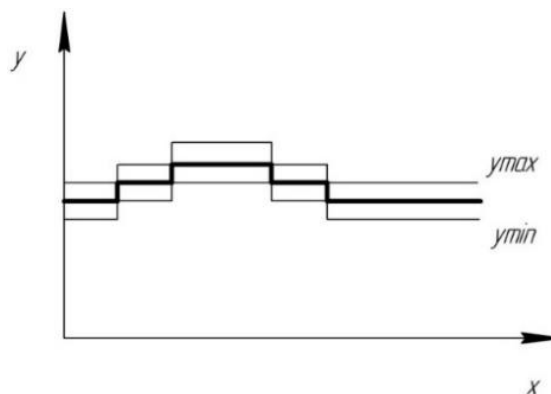


Рисунок 4.10 – Пример задания ограничений управляющих воздействий

Ограничения, заданные в блоке нелинейной оптимизации, формируют динамический «коридор» изменений управляющих воздействий, предотвращающий резкие колебания параметров управления. Подвижные ограничения реализуются с помощью специального блока скрипта, генерирующего выходные значения FV_MIN и FV_MAX. Например, для расхода флокулянта задан диапазон $\pm 10 \text{ м}^3/\text{час}$ относительно текущего значения, с жесткими пределами high-high и low-low от 10 до 50 $\text{м}^3/\text{час}$.

Анализ рисунков 4.11–4.14 показывает, что в прогнозном варианте модель демонстрирует устойчивое и предсказуемое поведение параметра объемной доли жидкой фазы на выходе из каждого из первых четырех промывателей. При сохранении общей динамики и амплитуды изменения, характерной для архивных данных, прогнозные кривые отличаются большей согласованностью по профилю и сглаженностью. На всех ступенях наблюдается отсутствие

резких скачков и провалов, в то время как в архивных графиках периодически фиксируются эпизоды колебаний, связанных, в том числе, с запаздыванием реакции системы на изменение входных условий.

В переходных зонах между квазистационарными участками видно, что модель, используя прогноз значения плотности пульпы, своевременно рассчитывает управляющее воздействие – корректирует расход флокулянта таким образом, чтобы стабилизировать показатель до наступления нежелательных отклонений. Это соответствует принципам прогнозного управления, где решение формируется на основе оценки будущего состояния объекта, а не только текущих измерений.

Результатом такого подхода становится более равномерное распределение реагента по ступеням промывки, адаптированное к текущим условиям процесса. Это позволяет снизить нагрузку на систему за счёт отказа от избыточной подачи флокулянта и одновременно сохранить качество осветления на требуемом уровне.

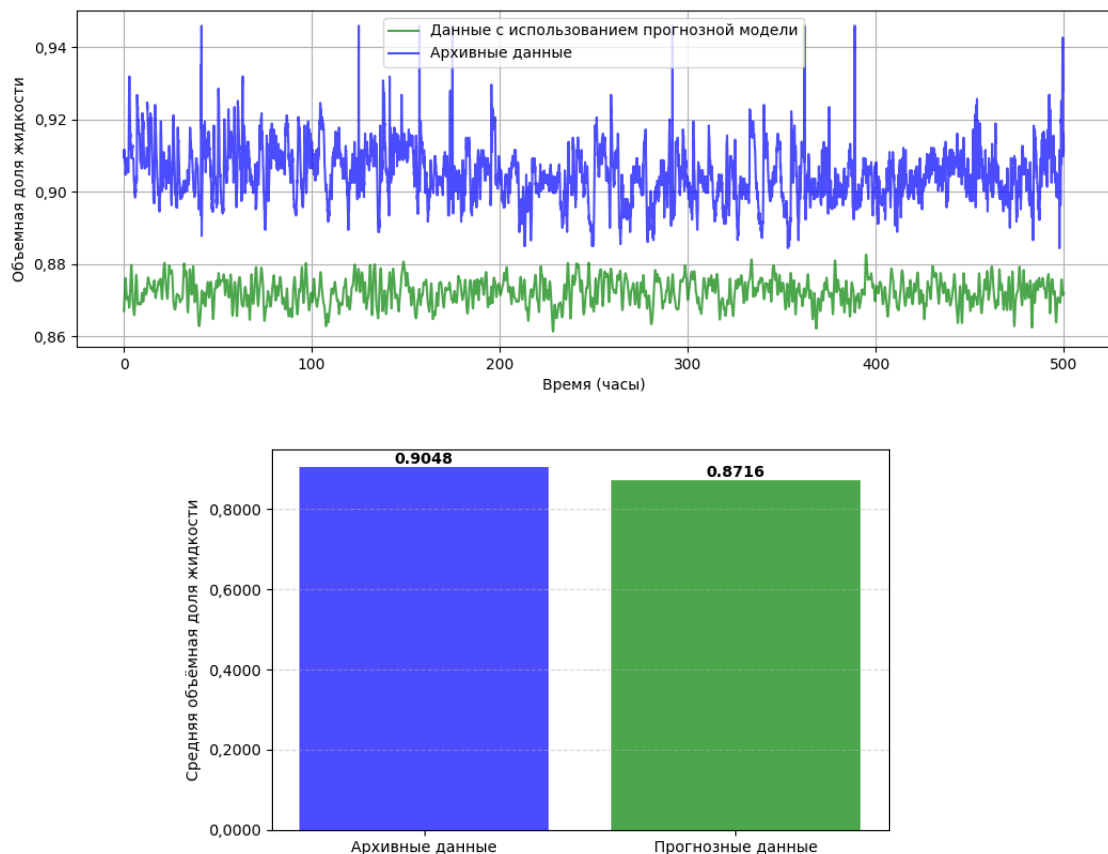


Рисунок 4.11 – Сравнение объемной доли жидкости из-под первого промывателя

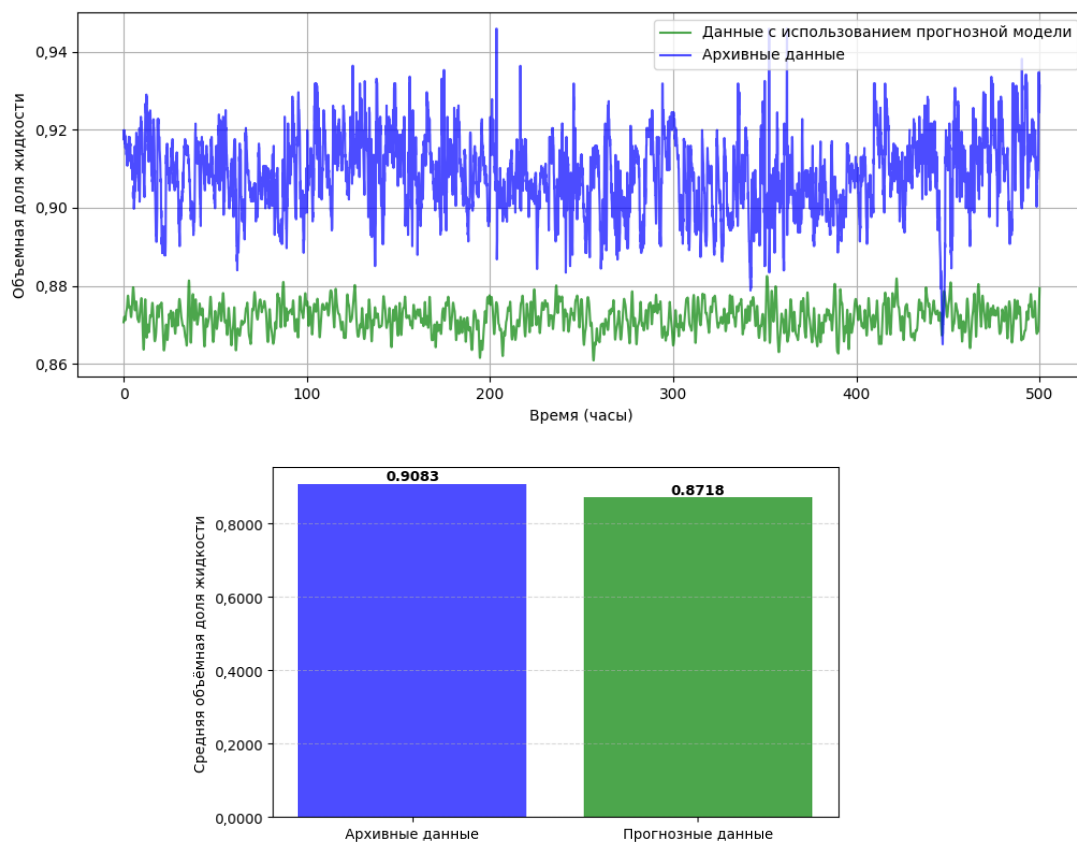


Рисунок 4.12 – Сравнение объемной доли жидкости из-под второго промывателя

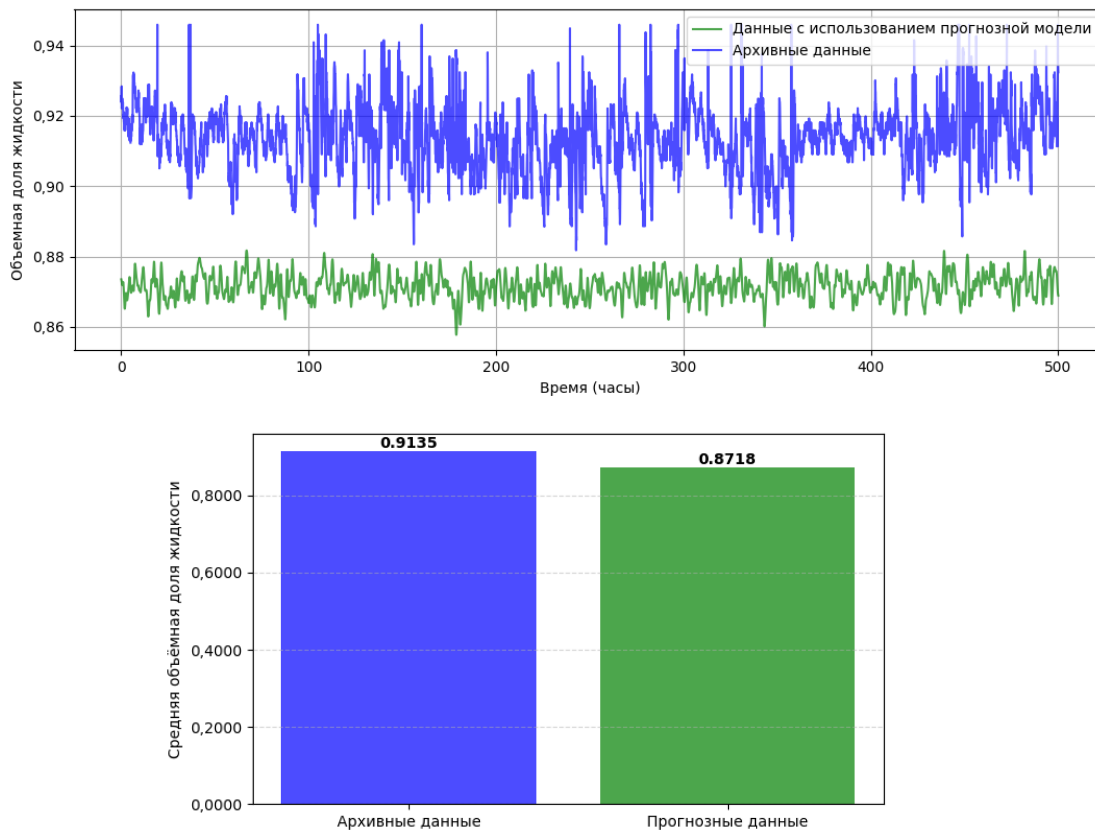


Рисунок 4.13 – Сравнение объемной доли жидкости из-под третьего промывателя

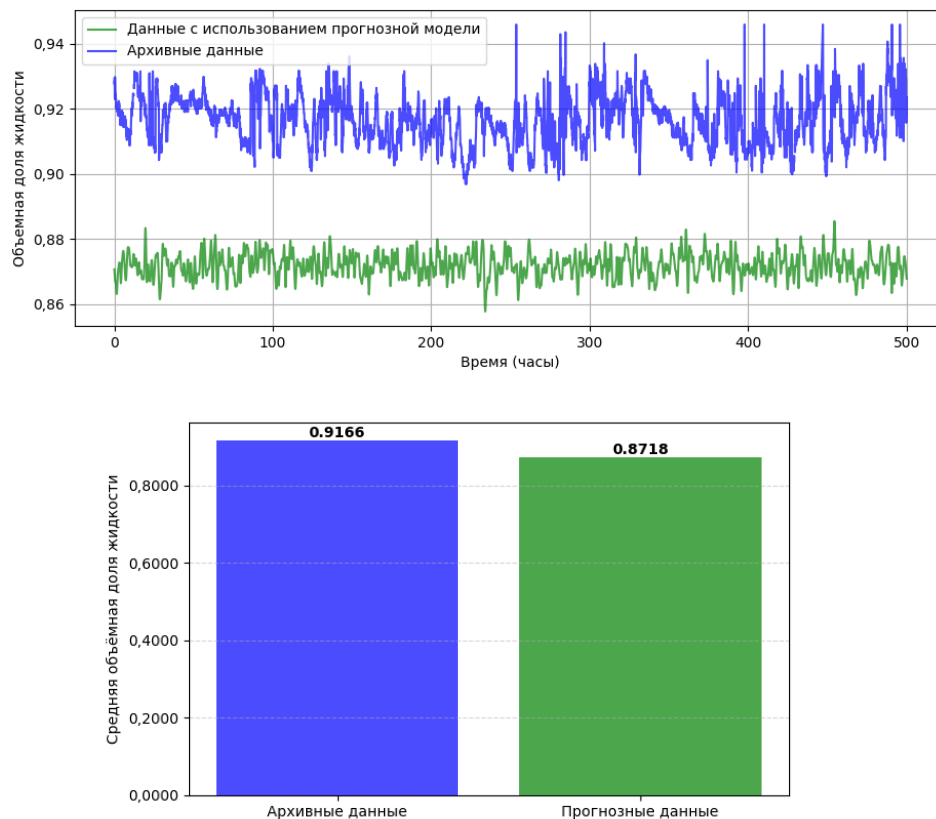


Рисунок 4.14 – Сравнение объемной доли жидкости из-под четвертого промывателя

На рисунке 4.15 представлено сравнение архивных и прогнозных значений объемной доли жидкой фазы в пульпе на выходе из пятого промывателя. В отличие от предыдущих ступеней, где основным критерием управления выступает достижение стабильного осветления за счёт корректировки подачи флокулянта, на пятой ступени дополнительно реализуется контур управления качеством отмытого шлама – в частности, по содержанию остаточной щелочи. Флокулянт также продолжает подаваться, и его дозировка в прогнозной модели регулируется на основе предсказанных значений объемной доли жидкости. Однако на данной ступени особую роль играет подача чистой промывной воды, объём которой напрямую влияет на уровень содержания NaOH в твердой фазе. Благодаря устойчивости работы модели на предыдущих этапах, а также за счёт прогнозной адаптации подачи флокулянта, удалось сохранить выходной параметр в допустимом диапазоне, несмотря на некоторое снижение величины по сравнению с архивной траекторией.

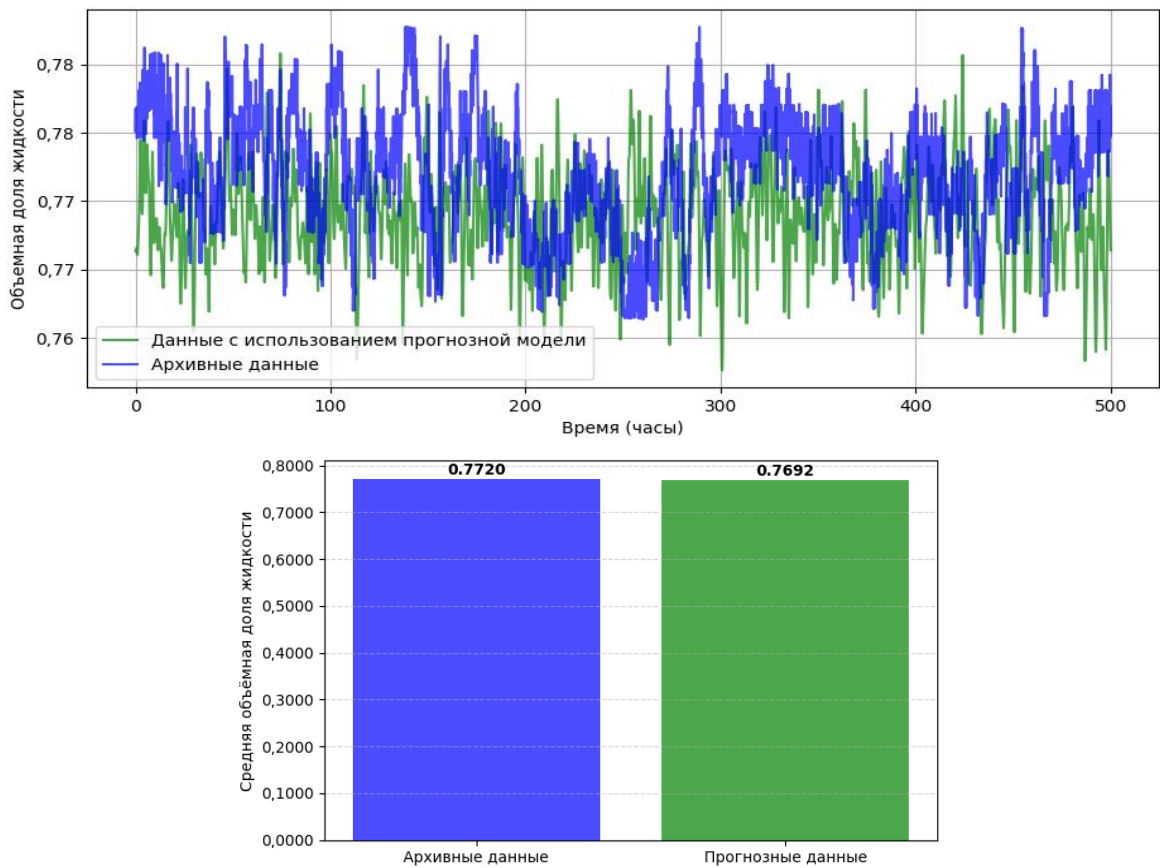


Рисунок 4.15 – Сравнение объемной доли жидкости из-под пятого промывателя

По результатам на рисунке 4.16 можно оценить, что изменение расхода флокулянта позволяет уменьшить содержание жидкости в промытой пульпе за исключением наиболее резких скачков концентрации. Такое управление можно считать удовлетворительным, поскольку идеально компенсировать все возмущающие воздействия на реальном объекте не представляется ВОЗМОЖНЫМ.

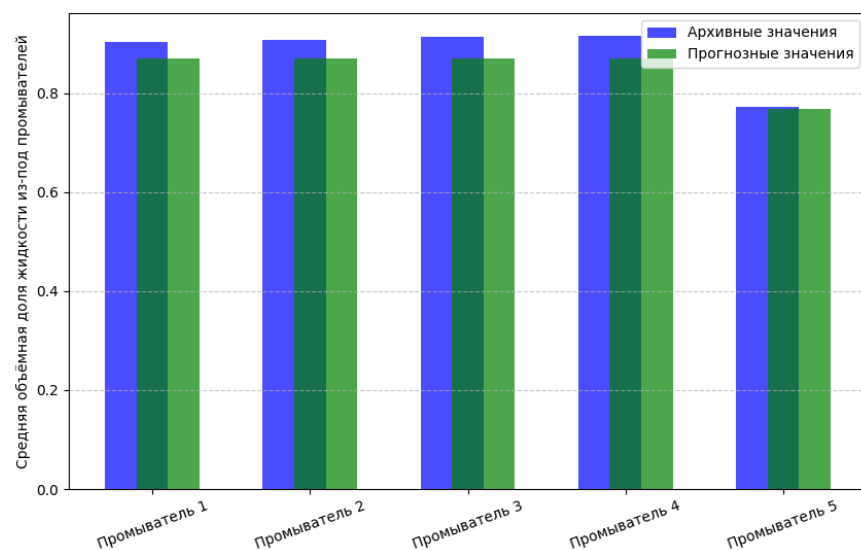


Рисунок 4.16 – Гистограмма результата работы прогнозной модели по параметру объемная доля жидкости в пульпе из-под промывателей

На рисунке 4.17 представлено сравнение архивного и прогнозного значений содержания щелочи в шламе после пятого промывателя. В ходе моделирования в качестве целевого значения была задана уставка 3,5 г/л. Прогнозная модель использовала это значение для расчёта управляющего воздействия, регулируя подачу чистой воды таким образом, чтобы обеспечить поддержание содержания щелочи вблизи заданного уровня. В отличие от архивного режима, где расход воды оставался фиксированным, в прогнозной стратегии удалось добиться удержания параметра в пределах целевой области в течение всего интервала. Следует отметить, что на пятом промывателе, помимо регулирования подачи воды, также сохранялся контур управления объемной долей жидкой фазы, осуществляемый за счёт корректировки расхода флокулянта.

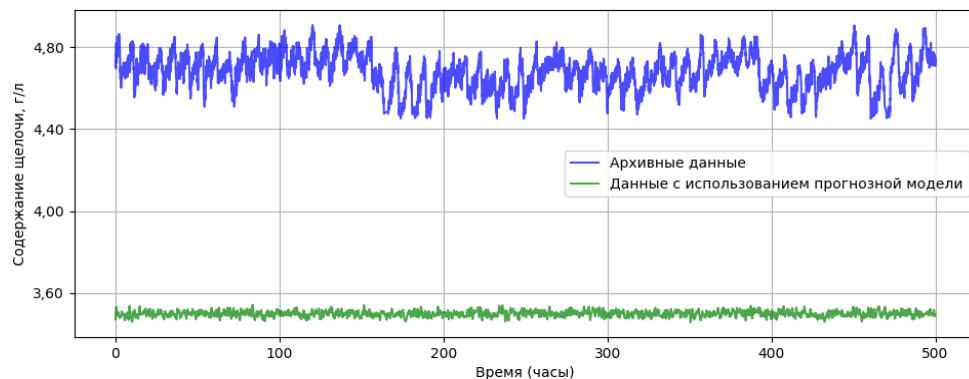


Рисунок 4.17 – Сравнение содержания щелочи из-под пятого промывателя

На рисунке 4.18 представлено распределение прогнозных значений содержания щелочи по всем ступеням промывки. Для пятой ступени дополнительно приведено архивное значение, что позволило осуществить визуальное сопоставление результатов. По остальным ступеням отображены только расчётные значения, полученные на основе прогноза. График отражает закономерное снижение концентрации NaOH от первой к пятой ступени, что соответствует логике противоточной схемы промывки и подтверждает внутреннюю согласованность прогнозной модели.

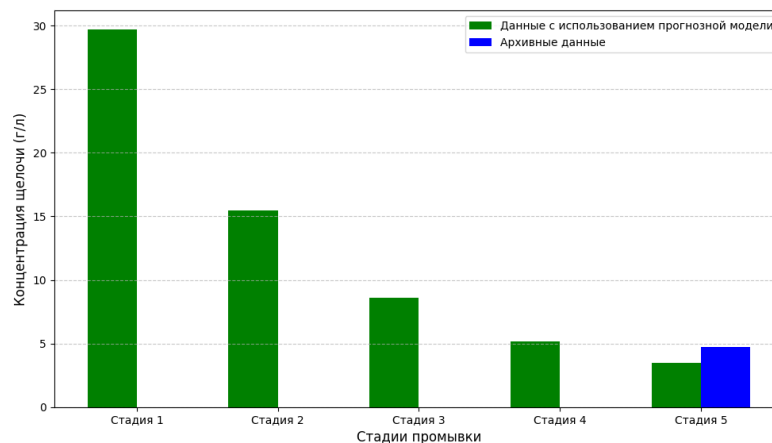


Рисунок 4.18 – Гистограмма результата работы прогнозной модели по параметру содержание щелочи из-под промывателей

4.4 Теоретический технико-экономический эффект внедрения прогнозной модели

Используя архивные данные и рассчитав при помощи прогнозной модели один календарный год, придем к технико-экономическим результатам внедрения нашей модели. Согласно архиву, средний годовой расход воды на промывку составляет 397,32 м³/ч, а щелочи NaOH 5,19 г/л. Внедрение прогнозной модели позволяет снизить значение соотношения Ж/Т на 3,98% из-под пятого промывателя. Однако, в свою очередь, за счет сохранения материального баланса, уменьшение количества воды, выводимой на шламовое поле, повышает количество воды, возвращаемой в оборот, причем оборотная вода содержит необходимую концентрацию щелочи. Значит, что для сохранения баланса и постоянства объема жидкости в промывателе, необходимо сократить количество поступающей чистой воды на такую же величину, а также сократить количество внедряемой щелочи. Результат работы прогнозной модели представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетное снижение расхода чистой промывной воды внедряемой щелочи NaOH

Календарный месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Уменьшение расхода воды, м ³ /ч	16,9	14,6	16,7	15,9	17,4	16,1	13,8	15,3	18,1	15,6	14,4	14,8
Уменьшение расхода NaOH г/л	1,8	2,4	1,2	2,1	2,7	2,9	0,6	0,9	0,8	1,1	2,1	1,4
Экономия щелочи, т/мес	20,9	23,7	13,6	22,5	31,7	32,2	6,0	9,7	10,0	11,7	20,7	14,2

Накопительный эффект уменьшения внедряемой щелочи NaOH представлен на рисунке 4.19. Таким образом, годовой эффект от экономии щелочи составит примерно 217 тонн NaOH за год, причем экономия чистой воды составляет 127 тыс. м³, что уменьшает нагрузку на экологическую инфраструктуру предприятия за счет сокращения объема отходов, а также повышает стабильности технологического процесса, что ведет к сокращению простоев и ремонтных затрат.

Также анализируя график, можно заметить, что максимальные значения возврата (до 32,2 тонн/мес) наблюдаются в первом полугодии (январь-июнь), в то время как во втором полугодии (июль-декабрь) эффект в разы меньше.

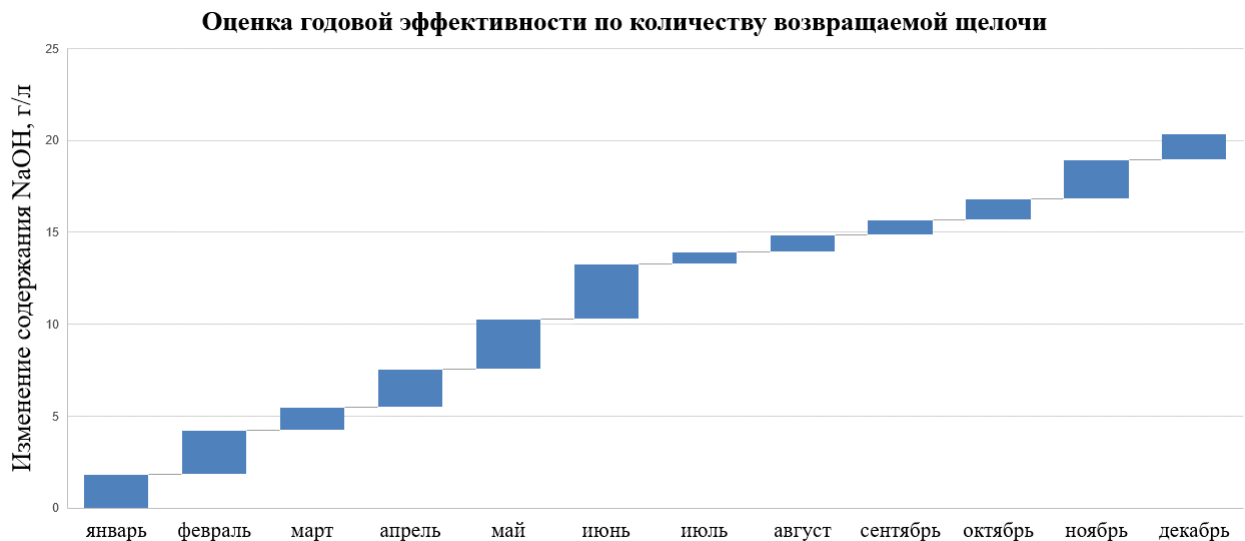


Рисунок 4.19 – Накопительный эффект уменьшения внедряемой щелочи в результате работы прогнозной модели

Предположительно, на это влияют температурно-климатические условия, а также изменения гранулометрического состава приходящего шлама. Это указывает на необходимость дальнейшей корректировки модели для снижения сезонных колебаний и повышения устойчивости процесса.

Выводы к главе 4

В данной главе была разработана и исследована система усовершенствованного управления процессом противоточной промывки красного шлама. Рассмотрены особенности технологического процесса, выделены ключевые параметры, влияющие на его эффективность. В ходе работы построена математическая модель, основанная на балансе масс, учитывающая концентрации растворённых веществ и твёрдых частиц на каждой стадии промывки. Для анализа эффективности процесса использованы уравнения противоточного равновесия, что позволило определить минимальное число стадий, необходимых для достижения заданного качества очистки шлама.

Разработанная прогнозная математическая модель противоточной промывки интегрирована в систему автоматизированного управления процессом (СУУ ТП Модель обеспечивает прогноз параметров, влияющих на эффективность промывки, и используется для формирования управляющих воздействий на подачу флокулянта и промывной воды.

Регулирующее воздействие формируется с учётом запаздывания объекта управления, что позволяет системе своевременно реагировать на изменения и снижать влияние колебаний входных параметров. Это обеспечивает устойчивость регулирования и стабилизацию контролируемых величин по всей линии промывки.

Проведённая оценка работы модели на архивных данных показала, что её применение позволяет достичь среднего снижения объёмной доли жидкой фазы более чем на 3 %, сохраняя стабильность показателя на всех стадиях. Одновременно на пятом промывателе обеспечено удержание содержания щелочи вблизи заданной уставки 3,5 г/л, что подтверждает работоспособность модели при одновременном регулировании двух параметров.

Расчёт эффективности внедрения показал, что использование прогнозной модели позволяет снизить годовой расход флокулянта на 217 тонн и сократить потребление чистой воды на 127 тыс. м³. Это указывает на снижение ресурсоёмкости процесса и подтверждает целесообразность дальнейшего применения предложенного подхода в производственных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи уменьшения объемной доли жидкой фазы в пульпе из-под конуса каждого промывателя и поддержания содержания щелочи на последнем этапе процесса противоточной промывки красного шлама глиноземных производств не более значения, указанного в регламенте. В ходе выполнения работы достигнуты следующие научно-технические результаты:

- На основе анализа существующих СУ процессом противоточной промывки КШ определены актуальные проблемы и методы их решения: для уменьшения времени регулирования по основным каналам управления, снижения объемной доли жидкой фазы из-под каждого промывателя и содержания гидроксида натрия в отвальном КШ необходимо модернизировать классическую структуру АСУ ТП с переходом на СУУ ТП;

- Разработана и экспериментально верифицирована математическая модель агрегации и деагрегации частиц КШ в присутствии флокулянта для косвенного измерения средневзвешенного диаметра флокулов из-под питающего стакана и распределение флокулов по размеру в процессе агрегации в питающем стакане в динамике и по его завершении с учетом возможной деагрегации флокулов с погрешностью не более 13 % в зависимости от исходного гранулометрического состава пульпы (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2022619089, №2022683727), выступающая в качестве основы программно-управляемого датчика (soft sensor) в составе СУУ ТП;

- По результатам анализа существующих моделей однокамерных радиальных промывателей разработана и экспериментально верифицирована адекватная обобщенная математическая модель промывателя, обеспечивающая расчет высоты уплотненного продукта в промывателе, расчет концентрации твердого вещества по высоте промывателя с отметки ниже питающего стакана, расчет концентрации твердого вещества на выходе из промывателя и учитывающая процесс флокуляции в питающем стакане (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2024614660);

- Разработана обобщенная прогнозная модель противоточной промывки КШ, рассчитывающая содержание твердого вещества и содержание щелочи на каждом этапе промывки. Верификация модели на архивных данных исследуемого предприятия продемонстрировала достаточную сходимость фактических и промоделированных результатов. Использование прогнозной модели противоточной промывки КШ и программно-управляемого датчика (soft sensor) в качестве модулей СУУ ТП показало уменьшение объемной доли жидкости в пульпе КШ из-под промывателей противоточной промывки более чем на 3 % за счет корректировки расхода флокулянта, и поддержание содержания щелочи на последнем этапе промывки не более 3,5 г/л за счет корректировки расхода промывной воды.

Направлением дальнейшего развития СУУ ТП процесса противоточной промывки является разработка блоков статической и динамической оптимизации. Кроме того, реализация экспертной системы позволит автоматизировать принятие решений и обеспечить гибкую настройку технологических режимов в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бричкин, В.Н. Процессы массовой кристаллизации из растворов в производстве глинозема / В.Н. Бричкин, В.М. Сизяков 1. – СПб. : СПГГИ , 2005.
2. Горелый, А.Ф. RU2064325C1 / А.Ф. Горелый, В.В. Лыско, А.С. Осыка, И.И. Пушкарев 1. – Россия, 1996.
3. Имашов, А.Н. Система автоматического дозирования флокулянта / А.Н. Имашов, В.Н. Малышкин, В.П. Рахлин, В.Р. Захаров // ФГУП “ЦКБА.” – 1989. – Vol. 8. – Р. 75-79.
4. Кузнецов, С.И. Физическая химия процесса производства глинозема по способу Байера / С.И. Кузнецов, В.А. Деревянкин 1. – М. : Metallurgizdat , 1964.
5. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер 1. – М. : Metallurgiya , 1978.
6. Логинова, И.В., Кырчиков, А.В. Технология производства глинозема : учебное пособие / А.В. Логинова И.В., Кырчиков, Н.П. Пенюгалова 1.
7. Мазель, В.А. Основные процессы и аппаратура глиноземного производства (технология производства глинозема) : учебник / В.А. Мазель 1. – М. : Metallurgizdat, 1941. – 400 р.
8. Мясников, С.К. Кинетика реагентного осаждения: общие эволюционные закономерности различных моделей / С.К. Мясников, А.Ю. Тихонов, Н.Н. Кулов // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Vol. 54. – Р. 135-143. DOI: 10.31857/s0040357120020116.
9. Пупышева, Е.А. Комбинированный CFD-DEM подход для оценки флокуляции металлургических пульп / **Е.А. Пупышева** // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых / 1. – г Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – Р. 404-405.
10. Пупышева, Е.А. Обоснование применения современных методов компьютерного моделирования для оценки процесса флокуляции в сгустителе красного шлама / **Е.А. Пупышева** // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XXII международной научно-технической конференции аспирантов и студентов / 1. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. – Р. 284-286.
11. Тришкин, В.Я. RU1773433C / В.Я. Тришкин, С.Д. Блонский, В.Д. Черевацкий 1. – Россия, 1990.
12. Трушин, А.М. Полуэмпирический метод определения скорости стесненного медленного движения / А.М. Трушин, Л.В. Равичев, В.Е. Яшин // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Vol. 53. – Р. 617-621. DOI: 10.1134/s0040357119060125.

13. Федорова, Э.Р. Разработка программного тренажера сгустителя красного шлама / Э.Р. Федорова, В.В. Моргунов, **Е.А. Пупышева** // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2022. – № № 6. DOI: 10.25791/ASU.6.2022.1368.
14. Федорова, Э.Р. Современные тенденции в области моделирования металлургических процессов и модернизации уровней АСУ ТП. Международный и отечественный опыт. / Э.Р. Федорова, Л.А. Русинов, А.С. Симаков, **Е.А. Пупышева**// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2023, №12. стр. 09-21. стр. 09-21. DOI: 10.25791/asu.12.2023.1474.
15. ГОСТ Р ИСО 15746-1—2016 Автоматизация производственных процессов и их интеграция. Интеграция приложений промышленных систем. Часть 1. Общие требования и рекомендации по проектированию / 1. – Стандартинформ РР - Москва, 2016.
16. Akbari, M. Enhancing an industrial feedwell design and operation using computational fluid dynamics / M. Akbari, H. Salimi, R. Zeynali, S. Akbari // Computational Particle Mechanics. – 2024. – Vol. 11. – P. 757-769. DOI: 10.1007/s40571-023-00651-5.
17. Anton, S. MULTIPLE-SECTION PLANT FOR COUNTER-CURRENT WASHING OF SUSPENDED SOLIDS / S. Anton. – 1991.
18. Antonio García A. A new mathematical model of continuous gravitational separation with coalescence of liquid-liquid emulsions / Antonio García A., S. Berres, E. Mas-Hernández // Chemical Engineering Research and Design. – 2022. – Vol. 182. – P. 37-50. DOI: 10.1016/J.CHERD.2022.03.044.
19. Bazhin, V. Monitoring of the Behaviour and State of Nanoscale Particles in a Gas Cleaning System of an Ore-Thermal Furnace / V. Bazhin, O. Masko // Symmetry. – 2022. – Vol. 14. – № 5. DOI: 10.3390/SYM14050923.
20. Beloglazov, I.I. The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry / I.I. Beloglazov, P.A. Petrov, V.Y. Bazhin // Eurasian Mining. – 2020. – Vol. 2020. – № 2. – P. 50-54. DOI: 10.17580/EM.2020.02.12.
21. Bergh, L. Expert control tuning of an industrial thickener / L. Bergh, P. Ojeda, L. Torres // IFAC-PapersOnLine. – 2015. – Vol. 28. – № 17. – P. 86-91. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.10.083.
22. Betancourt, F. Modeling and controlling clarifier–thickeners fed by suspensions with time-dependent properties / F. Betancourt, R. Bürger, S. Diehl, S. Farås // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 62. – P. 91-101. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.12.011.
23. Binnemans, K. Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from Steel Industry By-Products: A Critical Review / K. Binnemans, P.T. Jones, Á. Manjón Fernández, V. Masaguer Torres // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2020. – Vol. 6. – P. 505-540. DOI: 10.1007/s40831-020-00306-2.

24. Boikov, A. The Present Issues of Control Automation for Levitation Metal Melting / A. Boikov, V. Payor // *Symmetry*. – 2022. – Vol. 14. – № 10. DOI: 10.3390/SYM14101968.
25. Borra, C.R. Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue (Red Mud): A Review / C.R. Borra, B. Blanpain, Y. Pontikes et al. // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2016. – Vol. 2. – № 4. – P. 365-386. DOI: 10.1007/s40831-016-0068-2.
26. Bossis, G. Capillary flow of a suspension in the presence of discontinuous shear thickening / G. Bossis, Y. Grasselli, O. Volkova // *Rheologica Acta*. – 2021. DOI: 10.1007/s00397-021-01305-0.
27. Bürger, R. Settling velocities of particulate systems: 12. Batch centrifugation of flocculated suspensions / R. Bürger, F. Concha // *International Journal of Mineral Processing*. – 2001. – Vol. 63. – № 3. – P. 115-145. DOI: 10.1016/S0301-7516(01)00038-2.
28. Bürger, R. A mathematical model for batch and continuous thickening of flocculated suspensions in vessels with varying cross-section / R. Bürger, J.J.R. Damasceno, K.H. Karlsen // *International Journal of Mineral Processing*. – 2004. – Vol. 73. – № 2-4. – P. 183-208. DOI: 10.1016/S0301-7516(03)00073-5.
29. Bürger, R. A Stabilized Finite Volume Element Formulation for Sedimentation-Consolidation Processes / R. Bürger, R. Ruiz-Baier, H. Torres // *SIAM Journal on Scientific Computing*. – 2012. – Vol. 34. – № 3. – P. B265-B289. DOI: 10.1137/110836559.
30. Chen, D. Interaction-Aware Graph Neural Networks for Fault Diagnosis of Complex Industrial Processes / D. Chen, R. Liu, Q. Hu, S.X. Ding // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. – 2023. – Vol. 34. – P. 6015-6028. DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3132376.
31. Chen, G. Structural evolution of bed drainage channels under the shear effect of the whole process of tailings thickening / G. Chen, C. Li, Z. Ruan et al. // *Minerals Engineering*. – 2023. – Vol. 203. DOI: 10.1016/J.MINENG.2023.108364.
32. Ching, P.M.L. Advances in soft sensors for wastewater treatment plants: A systematic review. Vol. 44 / P.M.L. Ching, R.H.Y. So, T. Morck. – Elsevier Ltd, 2021.
33. Derlon, N. Batch settling curve registration via image data modeling / N. Derlon, C. Thürlimann, D. Dürrenmatt, K. Villez // *Water Research*. – 2017. – Vol. 114. – P. 327-337. DOI: 10.1016/J.WATRES.2017.01.049.
34. Ebrahimzadeh Gheshlaghi, M. Modeling industrial thickener using computational fluid dynamics (CFD), a case study: Tailing thickener in the Sarcheshmeh copper mine / M. Ebrahimzadeh Gheshlaghi, A. Soltani Goharrizi, A. Aghajani Shahrivar, H. Abdollahi // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2013. – Vol. 23. – № 6. – P. 885-892. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.11.002.

35. Echeverri, L. Optimization of the hydraulic design of thickener feedwells applying computational fluid dynamics and experimental techniques / L. Echeverri, T. Laros, F. Schoenbrunn et al. // 2012 SME Annual Meeting and Exhibit 2012, SME 2012, Meeting Preprints. – 2012. – P. 504-510.
36. Eric, M.M. Assessment of the Stability of the North Western Flank of the Ruashi II Open Pit Mine Southeast of the City of Lubumbashi -Numerical Approach / M.M. Eric, K. Mukoko // International Journal of Science and Research (IJSR). – 2020. – Vol. 9. DOI: 10.21275/SR20917230136.
37. Evans, K. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue / K. Evans // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Vol. 2. – № 4. – P. 316-331. DOI: 10.1007/s40831-016-0060-x.
38. Examiner, P. US6562238B1 / P. Examiner, J.W. Drodge. – 2003. – Vol. 1. – № 12.
39. Fan, X. Expert System for Sintering Process Control / X. Fan, X. Chen, Y. Wang // Expert Systems. – 2010. – № January. DOI: 10.5772/7073.
40. Fawell, P.D. Enhancing Gravity Thickener Feedwell Design and Operation for Optimal Flocculation through the Application of Computational Fluid Dynamics / P.D. Fawell, T. V. Nguyen, C.B. Solnordal, D.W. Stephens // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2021. – Vol. 42. – № 7. – P. 496-510. DOI: 10.1080/08827508.2019.1678156.
41. Fawell, P. Pilot and full-scale validation of thickener and feedwell modelling / P. Fawell, K. Simic, K. Mohanarangam et al. // Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. – Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2011. – P. 81-91.
42. Fedorova, E.R. Settling parameters determined during thickening and washing of red muds / E.R. Fedorova, **E.A. Pupysheva**, V. V. Morgunov // Tsvetnye Metally. – 2023. – Vol. 2023. – № 4. – P. 77-84. DOI: 10.17580/TSM.2023.04.10.
43. Fedorova, E.R. Red mud thickener statistical model in MATLAB system identification toolbox / E.R. Fedorova, M.E. Trifonova, O.K. Mansurova // Journal of Physics: Conference Series. – Institute of Physics Publishing, 2019. – Vol. 1333.
44. Fedorova, E.R. Algorithm to distribute feed pulp between paralleled thickeners during red-sludge thickening and washing in alumina production / E.R. Fedorova, N. V. Vasileva, **E.A. Pupysheva** // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1333. – № 4. – P. 042007. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042007.
45. Fedorova, E. Modelling of Red-Mud Particle-Solid Distribution in the Feeder Cup of a Thickener Using the Combined CFD-DPM Approach / E. Fedorova, **E. Pupysheva**, V. Morgunov // Symmetry 2022, Vol. 14, Page 2314. – 2022. – Vol. 14. – № 11. – P. 2314. DOI: 10.3390/SYM14112314.

46. Fedorova, E. Modeling of Particle Size Distribution in the Presence of Flocculant / E. Fedorova, E. **Pupysheva**, V. Morgunov // *Symmetry* 2024, Vol. 16, Page 114. – 2024. – Vol. 16. – № 1. – P. 114. DOI: 10.3390/SYM16010114.
47. Fortuna, L. Stacked Neural Network Approach for a Sulfur Recovery Unit / L. Fortuna, S. Graziani, A. Rizzo, M. G. Xibilia. – 2007. – 144-165 p.
48. Fu, X. Effect of Mixing on the Particle Size Distribution of Paracetamol Continuous Cooling Crystallization Products Using a Computational Fluid Dynamics-Population Balance Equation Simulation / X. Fu, D. Zhang, S. Xu et al. // *Crystal Growth and Design*. – 2018. – Vol. 18. – № 5. – P. 2851-2863. DOI: 10.1021/ACS.CGD.7B01671.
49. Fuks, N. Механизм конденсации и образование коллоидов / N. Fuks // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. – 1934. – Vol. 14. – P. 819-820. DOI: 10.3367/ufnr.0014.193406l.0819.
50. Garrido, P. Settling velocities of particulate systems / P. Garrido, R. Bürger, F. Concha // *International Journal of Mineral Processing*. – 2000. – Vol. 60. – № 3-4. – P. 213-227. DOI: 10.1016/S0301-7516(00)00014-4.
51. Glinskaya, N.Y. The optimization of contact sensors motion path in carrying out control operations / N.Y. Glinskaya, V. V. Elagin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1333. – № 4. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042008.
52. Golubev, V.O. Population balance of aluminate solution decomposition: Physical modelling and model setup / V.O. Golubev, D.G. Chistyakov, V.N. Brichkin, M.F. Postika // *Tsvetnye Metally*. – 2019. – Vol. 2019. – P. 75-81. DOI: 10.17580/tsm.2019.08.08.
53. Golubev, V.O. Dynamic simulation of industrial-scale gibbsite crystallization circuit / V.O. Golubev, T.E. Litvinova // *Journal of Mining Institute*. – 2021. – Vol. 247. – P. 88-101. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.10.
54. Gregory, J. Monitoring particle aggregation processes / J. Gregory // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2009. – Vols. 147-148. – № C. – P. 109-123. DOI: 10.1016/J.CIS.2008.09.003.
55. Heath, A.R. *Advances in Thickener Flocculant Delivery*.
56. Ilyushin, Y.V. Developing a Comprehensive Mathematical Model for Aluminium Production in a Soderberg Electrolyser / Y.V. Ilyushin, E.I. Kapostey // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 17. DOI: 10.3390/EN16176313.
57. Imran, S. A Statistical Model for Slurry Thickening / S. Imran, S. Azam, S.A. Imran. – 2008.
58. Kafumbila, J. Design of Counter Current Decantation in Copper Metallurgy / J. Kafumbila // *Technical Report*. – 2017. – № March. – P. 1-50. DOI: 10.13140/RG.2.2.11462.47687.

59. Koh, P.T.L. COMBINED POPULATION BALANCE AND CFD MODELLING OF PARTICLE AGGREGATION BY POLYMERIC FLOCCULANT / P.T.L. Koh, A.R. Heath, P.T.L. Koh, A.J. Parker. – 2003.
60. Lebedev, A.B. Использование спеченного сорбента для удаления сероводорода из отходящего промышленного газа при грануляции металлургических шлаков / A.B. Lebedev, V.A. Utkov, A.A. Khalifa // Записки Горного института. – 2019. – Vol. 237. – P. 292-292. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.292.
61. Lillotte, T.D. A novel approach to determine the granule density of milled ribbons using multi-stage air classification combined with dynamic image analysis / T.D. Lillotte, P. Bebernik, K.G. Wagner // Powder Technology. – 2021. – Vol. 381. – P. 685-697. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2020.12.023.
62. Liu, C. Distributed event-triggered model predictive control of coupled nonlinear systems / C. Liu, H. Li, Y. Shi, D. Xu // SIAM Journal on Control and Optimization. – 2020. – Vol. 58. – № 2. – P. 714-734. DOI: 10.1137/18M1176671.
63. Madarász, L. In-line particle size measurement based on image analysis in a fully continuous granule manufacturing line for rapid process understanding and development / L. Madarász, Á. Köte, B. Hambalkó et al. // International Journal of Pharmaceutics. – 2022. – Vol. 612. DOI: 10.1016/J.IJPHARM.2021.121280.
64. Maggi, F. Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution of suspended cohesive sediment / F. Maggi, F. Mietta, J.C. Winterwerp // Journal of Hydrology. – 2007. – Vol. 343. – № 1-2. – P. 43-55. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2007.05.035.
65. Nathanael, K. Computational modelling and microfluidics as emerging approaches to synthesis of silver nanoparticles – A review / K. Nathanael, P. Pico, N.M. Kovalchuk et al. // Chemical Engineering Journal. – 2022. – Vol. 436. DOI: 10.1016/J.CEJ.2022.135178.
66. Nazemzadeh, N. Integration of first-principle models and machine learning in a modeling framework: An application to flocculation / N. Nazemzadeh, A.A. Malanca, R.F. Nielsen et al. // Chemical Engineering Science. – 2021. – Vol. 245. DOI: 10.1016/J.CES.2021.116864.
67. Nielsen, R.F. Hybrid machine learning assisted modelling framework for particle processes / R.F. Nielsen, N. Nazemzadeh, L.W. Sillesen et al. // Computers and Chemical Engineering. – 2020. – Vol. 140. DOI: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2020.106916.
68. Nikolaeva, N. Effect of grinding on the fractional composition of polymineral laminated bituminous shales / N. Nikolaeva, T. Aleksandrova, A. Romashev // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2018. – Vol. 39. – № 4. – P. 231-234. DOI: 10.1080/08827508.2017.1415207.
69. Nopens, I. Modelling the activated sludge flocculation process combining laser light diffraction particle sizing and population balance modelling (PBM) / I. Nopens, C.A. Biggs, B. De

Clercq et al. // *Water Science and Technology*. – 2002. – Vol. 45. – № 6. – P. 41-49. DOI: 10.2166/WST.2002.0092.

70. Nopens, I. Solving the inverse problem for aggregation in activated sludge flocculation using a population balance framework / I. Nopens, N. Nere, P.A. Vanrolleghem, D. Ramkrishna // *Water Science and Technology*. – 2007. – Vol. 56. – № 6. – P. 95-103. DOI: 10.2166/wst.2007.589.

71. Owen, A.T. The effect of flocculant solution transport and addition conditions on feedwell performance in gravity thickeners / A.T. Owen, T. V. Nguyen, P.D. Fawell // *International Journal of Mineral Processing*. – 2009. – Vol. 93. – № 2. – P. 115-127. DOI: 10.1016/J.MINPRO.2009.07.001.

72. Papuga, K. Do we have to use suspensions with low concentrations in determination of particle size distribution by sedimentation methods? / K. Papuga, J. Kaszubkiewicz, D. Kawałko // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 389. – P. 507-521. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2021.05.060.

73. Piirainen, V.Y. Application of new materials for red mud immobilization / V.Y. Piirainen, A.A. Boeva, T.Y. Nikitina // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 854 KEM. – P. 182-187. DOI: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.854.182.

74. Pyagay, I.N. Carbonization processing of bauxite residue as an alternative rare metal recovery process / I.N. Pyagay, E.A. Kremcheev, L.A. Pasechnik, S.P. Yatsenko // *Tsvetnye Metally*. – 2020. – Vol. 2020. – № 10. – P. 56-63. DOI: 10.17580/TSM.2020.10.08.

75. Qi, C. Flocculation-dewatering prediction of fine mineral tailings using a hybrid machine learning approach. / C. Qi, H.-B. Ly, Q. Chen et al. // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 244. – P. 125450. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125450.

76. Qin, S.J. A survey of industrial model predictive control technology / S.J. Qin, T.A. Badgwell // *Control Engineering Practice*. – 2003. – Vol. 11. – № 7. – P. 733-764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

77. Quezada, G.R. Improving the flocculation performance of clay-based tailings in seawater: A population balance modelling approach / G.R. Quezada, M. Jeldres, P. Robles et al. // *Minerals*. – 2020. – Vol. 10. – № 9. – P. 1-14. DOI: 10.3390/min10090782.

78. Richardson, J.F. Sedimentation and fluidisation: Part I / J.F. Richardson, W.N. Zaki // *Chemical Engineering Research and Design*. – 1997. – Vol. 75. DOI: 10.1016/s0263-8762(97)80006-8.

79. Romashev, A.O. Adaptive approach formation using machine vision technology to determine the parameters of enrichment products deposition / A.O. Romashev, N. V. Nikolaeva, B.L. Gatiatullin // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Vol. 256. – P. 677-685. DOI: 10.31897/PMI.2022.77.

80. Ruan, Z. Effect of interparticle interactions on the yield stress of thickened flocculated copper mineral tailings slurry / Z. Ruan, A. Wu, R. Bürger et al. // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 392. – P. 278-285. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2021.07.008.

81. Salamatov, O. To flocculant effect on the kinetics of dewatering and washing processes of red muds from low silicon bauxites in alumina production / O. Salamatov, V. Salamatov // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2019. – Vol. 23. – P. 404-414. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-2-404-414.
82. Shi, Z. Modeling of flocculation and sedimentation using population balance equation / Z. Shi, G. Zhang, Y. Zhang et al. // Journal of Chemistry. – 2019. – Vol. 2019. DOI: 10.1155/2019/9187204.
83. Singh, M. New finite volume approach for multidimensional Smoluchowski equation on nonuniform grids / M. Singh // Studies in Applied Mathematics. – 2021. – Vol. 147. – № 3. – P. 955-977. DOI: 10.1111/sapm.12415.
84. Spehar, R. Aggregate densification in the thickening of flocculated suspensions in an un-networked bed / R. Spehar, A. Kiviti-Manor, P. Fawell et al. // Chemical Engineering Science. – 2015. – Vol. 122. – P. 585-595. DOI: 10.1016/j.ces.2014.10.018.
85. Spencer, K.L. A structure–function based approach to floc hierarchy and evidence for the non-fractal nature of natural sediment flocs / K.L. Spencer, J.A.T. Wheatland, A.J. Bushby et al. // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – № 1. DOI: 10.1038/S41598-021-93302-9.
86. Spicer, P.T. Coagulation and Fragmentation: Universal Steady-State Particle-Size Distribution / P.T. Spicer, S.E. Pratsinis // AIChE Journal. – 1996. – Vol. 42. – P. 1612-1620. DOI: 10.1002/aic.690420612.
87. Tang, H. Modelling Flocculation in a Thickener Feedwell Using a Coupled Computational Fluid Dynamics–Population Balance Model / H. Tang, Y. Fan, X. Ma et al. // Minerals. – 2023. – Vol. 13. DOI: 10.3390/min13030309.
88. Tanguay, M. Modelling the impact of two different flocculants on the performance of a thickener feedwell / M. Tanguay, P. Fawell, S. Adkins // Applied Mathematical Modelling. – 2014. – Vol. 38. – № 17-18. – P. 4262-4276. DOI: 10.1016/J.APM.2014.04.047.
89. Tanvar, H. Hydrometallurgical Recycling of Red Mud to Produce Materials for Industrial Applications: Alkali Separation, Iron Leaching and Extraction / H. Tanvar, B. Mishra // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2021. – Vol. 52. – № 5. – P. 3543-3557. DOI: 10.1007/s11663-021-02285-5.
90. Thomas, D.N. Flocculation modelling: A review / D.N. Thomas, S.J. Judd, N. Fawcett // Water Research. – 1999. – Vol. 33. – № 7. – P. 1579-1592. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00392-3.
91. Tian, J.L. The Application of Intelligent Control to Red Mud Settling and Washing in an Alumina Refinery / J.L. Tian, Z.Y. Zhang, Y.H. Jiang // Minerals, Metals and Materials Series. – 2021. – Vol. 6. – P. 3-9. DOI: 10.1007/978-3-030-65396-5_1.

92. Tripathy, A.K. Towards Solving the Complexity Associated with Continuous Countercurrent Decantation (CCD) System in Solid–Liquid Separation Processes / A.K. Tripathy, S.S. Behera, B. Marandi et al. // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D.* – 2024. – Vol. 105. – № 2. – P. 1223-1229. DOI: 10.1007/s40033-023-00533-3.
93. Trushko, V.L. Topicality and possibilities for complete processing of red mud of aluminous production / V.L. Trushko, V.A. Utkov, V.Y. Bazhin // *Journal of Mining Institute.* – 2017. – Vol. 227. – P. 547-553. DOI: 10.25515/pmi.2017.5.547.
94. Ulyasheva, N.M. Development of the drilling mud composition for directional wellbore drilling considering rheological parameters of the fluid / N.M. Ulyasheva, E.L. Leusheva, R.N. Galishin // *Journal of Mining Institute.* – 2020. – Vol. 244. – № 4. – P. 454-461. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.8.
95. Usher, S. Shear effects in thickening / S. Usher, R. Spehar, P. Scales // *Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings.* – 2010. – P. 375-384. DOI: 10.36487/acg_rep/1063_32_usher.
96. Vahedi, A. Settling velocities of multifractal flocs formed in chemical coagulation process / A. Vahedi, B. Gorczyca // *Water Research.* – 2014. – Vol. 53. – P. 322-328. DOI: 10.1016/J.WATRES.2014.01.008.
97. Viduka, S. Thickener feedwell internal trough slurry distribution method / S. Viduka, B. Henriksson // *Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings.* – 2021. – P. 71-78. DOI: 10.36487/acg_repo/2115_07.
98. Wang, X. Effect of feed solid concentration on tailings slurry flocculation in a thickener by a coupled CFD-PBM modelling approach / X. Wang, B. Cui, D. Wei et al. // *Journal of Environmental Chemical Engineering.* – 2021. – Vol. 9. – № 6. DOI: 10.1016/J.JECE.2021.106385.
99. Wilms, A. Development and Evaluation of an In-line and On-line Monitoring System for Granule Size Distributions in Continuous Roll Compaction/Dry Granulation Based on Laser Diffraction / A. Wilms, R. Meier, P. Kleinbudde // *Journal of Pharmaceutical Innovation.* – 2021. – Vol. 16. – № 2. – P. 247-257. DOI: 10.1007/S12247-020-09443-3.
100. Xie, D.D. Efficient Application of Automation Technology in Thickener Process / D.D. Xie, X. Tong, X. Xie et al. // *Advanced Materials Research.* – 2015. – Vol. 1094. – P. 441-444. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1094.441.
101. Xu, N. An intelligent control strategy for thickening process / N. Xu, X. Wang, J. Zhou et al. // *International Journal of Mineral Processing.* – 2015. – Vol. 142. – P. 56-62. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.01.007.
102. Zhan, M. Numerical simulation of mechanical flocculation in water treatment / M. Zhan, M. You, L. Liu et al. // *Journal of Environmental Chemical Engineering.* – 2021. – Vol. 9. – № 4. DOI: 10.1016/J.JECE.2021.105536.

103. Zhang, H. Stochastic chance-constrained optimization framework for the thickening-dewatering process with an uncertain feed quantity. Vol. 173 / H. Zhang, F. Wang, K. Li, L. Zhao. – Institution of Chemical Engineers, 2021.

104. Zhou, L. CFD–DEM study of gas–solid flow characteristics in a fluidized bed with different diameter of coarse particles / L. Zhou, W. Lv, L. Bai et al. // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 2376-2388. DOI: 10.1016/J.EGYR.2022.01.174.

105. Zinoveev, D. V. Global recycling experience of red mud - a review. Part i: pyrometallurgical methods / D. V. Zinoveev, P.I. Grudinskii, V.G. Dyubanov et al. // Izvestiya Visshikh Uchebnykh Zavedenii. Chernaya Metallurgiya - Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2018. – Vol. 61. – № 11. – P. 843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024614660

**Программа для расчета релаксационной схемы
осаждения металлургической пульпы в сгустителе**

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

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэлевна (RU), Пупышева
Елена Александровна (RU)*

Заявка № **2024611647**
Дата поступления **31 января 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **28 февраля 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022683727

Программа для расчета средневзвешенного диаметра
частиц

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

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэльевна (RU), Пупышева
Елена Александровна (RU), Моргунов Владимир
Викторович (RU)*



Заявки № 2022682966

Дата поступления 30 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 декабря 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022619089

**Программа для расчета гранулометрического состава
агрегированной пульпы**

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

Авторы: *Федорова Эльмира Рафаэлевна (RU), Пунышева
Елена Алесандровна (RU)*



Заявка № **2022618597**

Дата поступления **13 мая 2022 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **19 мая 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов диссертации

АО «МЦД»

Россия, 125167 г. Москва, ул. Викторенко д.5 стр.1, этаж 11, помещ. 11.01

Тел. +7 (495) 644-06-08

ИНН 7720666171 КПП 771401001 ОГРН 1097746511334

ОКПО 62743131



Акт № 54 от 12 марта 2025 г.

о внедрении результатов кандидатской диссертации Пупышевой Елены Александровны в АО «Моделирование и Цифровые двойники».

Данным актом подтверждаем, что результаты диссертации на тему «Система усовершенствованного управления процессом противоточной промывки красного шлама глиноземного производства», а именно методика расчета процесса агрегации и деагрегации частиц в питающем стакане одноярусного радиального сгустителя в присутствии флокулянта на основе модели популяционного баланса зарекомендовала себя как удобный инструмент в расчетах, применяемый в практике АО «Моделирование и Цифровые двойники». Получаемые в методике параметры распределения флоккул по размерам и средневзвешенный диаметр флоккулы из-под питающего стакана могут быть использованы как критерии оптимизации при варьировании технологических параметров процессов сгущения и промывки (расхода пульпы, содержания твёрдого в пульпе, плотности твёрдого, расхода флокулянта, гранулометрического состава руды).

Описанная методика была разработана Пупышевой Е.А. в рамках подготовки ее диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

С учетом положительных результатов опробования, данная методика рекомендована к внедрению и систематическому использованию в исследовательской работе АО «Моделирование и Цифровые двойники».

Директор филиала СЗФО - Директор по развитию бизнеса, к.т.н.

Феоктистов А.Ю.

Руководитель направления гидрогазодинамики

Ярошенко В.И.

Руководитель направления технического обучения – инженер по гидрогазодинамике



Клюев А.Ю.