

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*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Федорова Эльмира Рафаэльевна

Официальные оппоненты:

Уткин Лев Владимирович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», институт компьютерных наук и безопасности, высшая школа технологий искусственного интеллекта, профессор;

Ремизова Ольга Александровна

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

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится **25 июня 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д. 2, **аудитория № 1171а**.

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

Автореферат разослан 25 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА

Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 шламоохранилище 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 флокулянтном 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, А.Л. Рутковский, 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 гидromеталлургического 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 диссертационного исследования – 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 диссертации 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 флокул 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 флокул из-под питающего стакана и распределения флокул 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);

– 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) 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).

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 прогнозной модели процесса противоточной 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 диссертации, 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, 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.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, поставлены цель и задачи работы, отражены ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе отражены основные теоретические аспекты процесса противоточной промывки КШ в технологии получения глинозема по способу Байера. Проведен анализ существующих СУ процессом противоточной промывки КШ. Освещенные проблемы подтверждают необходимость модернизации СУ. Для реализации модернизации АСУ ТП предложена разработка программных модулей в качестве компонентов СУУ ТП.

Во второй главе представлены различные математические модели описания агрегации частиц, обоснован выбор модели популяционного баланса. Определены качественные и количественные показатели исследуемой пробы КШ. Представлены геометрические особенности питающего стакана и основные параметры по материальным потокам. Описана разработка модели процесса агрегации и деагрегации частиц пульпы в присутствии флокулянта, как основы для программно-управляемого датчика (soft sensor) и компонента СУУ ТП. Проведена верификация в серии лабораторных экспериментов.

В третьей главе представлена разработка обобщенной математической модели промывателя, позволяющая рассчитывать объемную долю жидкости в пульпе КШ из-под конуса промывателя. Особое внимание уделено экспериментальной методике определения ключевых параметров для расчета обобщенной модели (индекс

стесненного осаждения, критическая концентрация, скорость Стокса), основанной на обработке видеоданных с применением машинного обучения. Верификация модели проведена на базе данных с исследуемого предприятия.

В четвертой главе обоснована необходимость модернизации структуры АСУ ТП, представлены основные составные части СУУ ТП. Описана разработка программного модуля на базе обобщенной прогнозной математической модели процесса противоточной промывки КШ. Верификация модели проведена на базе данных с исследуемого предприятия. Доказана на срезе архивных производственных данных эффективность от внедрения прогнозной модели в качестве модуля СУУ ТП в целях уменьшения доли жидкости в пульпе из-под промывателей и поддержания содержания щелочи на последнем этапе промывки не более значения, указанного в регламенте.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы, результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

Крупность частиц шлама влияет на общую эффективность процесса осаждения. Анализ гранулометрического состава проб КШ с исследуемого предприятия перед процессом противоточной промывки показал, что распределение частиц по размерам находится в диапазоне 2 – 300 мкм, где 44 % от общей части измеренных проб – фракция КШ, представленная классами <30 мкм (рисунок 1, таблица 1), следовательно, процесс осаждения будет проходить медленно и потребует увеличения полезной площади осаждения промывателя. Для укрупнения частиц добавляется

полиакриламидный флокулянт к потоку пульпы на входе в каждый промыватель и в питающий стакан, что повышает скорость осаждения, уплотнение КШ, как следствие снижение объёмной доли жидкой фазы и количества выносимой щелочи в отвальном шламе.

Измерение размера укрупнённой флоккулы КШ из-под питающего стакана в реальном времени затруднено как из-за конструктивных ограничений аппарата, так и вследствие высокой щелочности жидкой фазы: даже незначительные дефекты, возникающие в ходе эксплуатации или при периодическом подъёме датчика для очистки, могут привести к его быстрому выходу из строя. Использование вакуумных пробоотборников не подходит для проведения анализа из-за деструкции хрупких флокул при транспортировке. Но знания о качестве процесса флокуляции в питающем стакане позволят уменьшить время регулирования процесса и, соответственно, снизить вынос Al_2O_3 и Na_2O с отвальным шламом.

Актуальным решением вышеизложенной проблемы является использование программно-управляемого датчика (soft sensor), основанного на математической модели для считывания и распознавания данных с дальнейшей оценкой производственных параметров (ГОСТ Р ИСО 15746-1).

В основе программно-управляемого датчика (soft sensor) в исследуемом процессе используется математическая модель агрегации КШ в присутствии флокулянта на базе модели популяционного баланса (МПБ, РВМ – population balance model), которая позволяет рассчитывать средневзвешенный диаметр частиц и распределение флокул по размеру в питающем стакане в зависимости от свойств технологических параметров процесса (таблица 2). Параметры из таблицы 2 описывают: свойства подаваемого КШ (плотность, площадь поверхности частицы, концентрация твердых частиц), свойства жидкой фазы (плотность, вязкость), параметры подачи флокулянта (концентрация, расход), размеры питающего стакана, время моделирования.

Параметры, связанные с материалом КШ и свойствами жидкой фазы, постоянны, т.к. связаны с горно-геологическими условиями бокситового месторождения и технологией процесса, т.е.

являются граничными условиями. Параметр площади поверхности частицы рассчитывается через исходный гранулометрический состав. Параметры дозировки флокулянта и концентрации твердых частиц в пульпе находятся в диапазоне технологических параметров исследуемого предприятия.

На основе проведенных исследований установлено, что рекомендуемое время пребывания пульпы в питающем стакане составляет 20–40 секунд, что подтвердило целесообразность выбранного временного интервала моделирования в 30 секунд.

Основой МПБ в условиях турбулентных потоков, характерных для питающих стаканов в промывателях, является предложенное Хаунслоу и Спайсером уравнение (1), слагаемые уравнения определяются в соответствии с параметрами исследуемой пробы КШ и флокулянта.

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

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

t – время, с,

$\beta_{i,j}$ – скорость столкновения между частицами i и j размера (ядро агрегации), m^3/c ,

S_i – скорость разрушения (ядра) частицы размера i , c^{-1} ,

$\Gamma_{i,j}$ – функция распределения разрушения (количество частиц размера j , образующихся при разрушении частицы размера i).

Исходное распределение частиц по размеру (таблица 1) требует дискретизации (разбиения на расчетные интервалы – каналы) для приведения к начальному распределению частиц $N_{i=0}$ (2):

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

где V_i – объем канала i .

Объем канала V_i рассчитывается по уравнению (3):

$$V_i = d_i^3 \frac{\pi}{6} \quad (3)$$

где d_i – средний размер частицы канала i , мкм.

Модель и пользовательский интерфейс реализованы на языке Python. Результатами работы модели являются: распределения флокул в питающем стакане в процессе флокуляции (рисунок 2) и средневзвешенный диаметр частиц (рисунок 3). Для исследуемого шлама твердая фаза после флокуляции в основном представлена следующими классами: 27 – 153 мкм – 85,4 %.

Модель также позволяет оценить агрегацию и деагрегацию частиц: разрушение можно наблюдать на штриховых линиях, результирующей кривой по распределению частиц по размерам является кривая, обозначенная синим цветом. Средневзвешенный диаметр частиц (рисунок 3) вычислялся методом расчета среднего диаметра Де Брукера или Хардена по результирующей кривой.

Для верификации модели было проведено 15 экспериментов по осаждению КШ в присутствии флокулянта в лабораторных цилиндрах объемом 250 мл при температуре 93-98 °С. В ходе экспериментальных исследований с помощью микроскопа АОМЕКІЕ 64-640 и капельного метода исследования были получены изображения кластеров осажденного КШ, где флокула может быть охарактеризована как асимметричное образование, окружающее осажденные агрегаты (рисунок 4). Сравнение расчётного средневзвешенного диаметра флокул (рисунок 3) и экспериментальных значений диаметра флокул (таблица 3) показало, что ошибка модели составляет 13 %. Однако учитывая высокую природную вариабельностью исходных данных (рисунок 1), систематическую ошибку при проведении эксперимента, а также среднеквадратичное отклонение по данным микроскопических измерений в 13,64 мкм, можно сделать вывод о достаточной степени адекватности разработанной математической модели агрегации и деагрегации КШ в присутствии флокулянта.

Разработанная математическая модель является основой программно-управляемого датчика (soft sensor) для определения неизмеряемого параметра «средневзвешенный диаметр частиц» из-под питающего стакана и частью обобщенной модели промывателя в составе СУУ ТП.

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.

АСУ ТП процесса противоточной промывки КШ сталкивается с рядом проблем, связанных с постоянно действующим возмущением (непостоянство потока пульпы в питании промывателя) и наличием неизмеряемых параметров (диаметр частиц из-под питающего стакана промывателя, уровень раздела фаз свободного и стесненного осаждения). Инерционность по некоторым каналам управления противоточным процессом промывки КШ определяется совокупным влиянием динамических характеристик отдельных промывателей, их взаимосвязью, нелинейностью процесса осаждения, конструктивно-технологическими особенностями системы, а также параметрической неопределенностью. Управление отдельными аппаратами промывателей усложняется совокупным запаздыванием, возникающим из-за транспортного запаздывания и взаимного влияния соседних промывателей.

Предложенная структура СУУ ТП (рисунок 4) на базе математических модулей: программно-управляемого датчика (soft sensor) и прогнозной модели противоточной промывки, включающей обобщенную модель промывателя и подмодель расчета содержания щелочи из-под каждого промывателя. Модули позволяют с учетом времени расчета моделей рассчитать параметры: средневзвешенный диаметр флокулы, распределение флокул по размерам из-под питающего стакана каждого промывателя, уровень раздела фаз свободного и стесненного осаждения в каждом промывателе, объемную долю жидкости и содержание щелочи из-под каждого промывателя, и скорректировать управляющие воздействия в режиме советчика или в режиме реального управления.

Ключевым элементом СУУ ТП выступает адекватная прогнозная модель, обеспечивающая оперативный и точный прогноз выходных параметров промывки. Внедрение прогнозной модели противоточной промывки КШ и программно-управляемого датчика (soft sensor) в качестве модулей СУУ ТП в СУ необходима для снижения общего времени регулирования при управлении процессом с учетом распределения материальных потоков и их взаимного влияния друг на друга.

Обобщенная модель промывателя КШ включает подмодель роста и распада частиц под действием флокулянта, а также подмодель свободного и стесненного осаждения (рисунок 5). Для получения эмпирических параметров обобщенной модели промывателя индекса стесненного осаждения, критической концентрации, скорости Стокса был проведен лабораторный опыт по осаждению КШ с исследуемого предприятия с использованием технологии машинного зрения (рисунок 6). Изменение концентрации твердого вещества проходит по всей высоте рабочего объема промывателя и описывается дифференциальным уравнением (4-6). Поведение плотности вещества в зоне уплотнения описывается уравнением Кинча (7). Результат работы модели представлен на рисунке 7.

В подмодели расчета содержания NaOH из-под конусов промывателей учитывается расход флокулянта при расчете общего расхода жидкости на стадии $i+1$ ($Q_{liq,i+1}$) в системе из n промывателей (8):

$$Q_{liq,i+1} = Q_{pulp,i} + Q_{water,i} + Q_{floc,i} \quad (8)$$

Массовый баланс для i -го промывателя принимает вид (9):

$$C_{i+1} = \frac{Q_{pulp,i}C_i + Q_{water,i}C_{water,i} + Q_{floc,i}C_{floc}}{Q_{pulp,i} + Q_{water,i} + Q_{floc,i}}, \quad (9)$$

где C_i – концентрация щелочи на стадии i , г/л,

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

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

C_{floc} – концентрация щелочи 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.

Полученные результаты обобщенных моделей промывателей и подмодель расчета содержания щелочи из-под каждого промывателя были экспериментально верифицированы на исследуемом предприятии: сравнительный анализ результатов математических моделей и лабораторных значений (таблицы 4 и 5) показывает, что расхождения по соотношению жидкой и твердой фаз (Ж/Т) и содержанию NaOH не превышают 0,1–0,5 единицы, а коэффициент детерминации (R^2) достигает 0,7–0,9. Результаты расчета математических моделей входят в технологический диапазон, заданный внутренним регламентом предприятия, что подтверждает применимость разработанной прогнозной модели противоточной промывки для оценки технологических параметров.

Для оценки влияния прогнозной модели в СУ используется ПО Proficy CSense модуль Architect. Модуль предоставляет инструменты для многокомпонентного моделирования и оптимизации, с возможностью настройки собственных моделей и интеграции объектов, созданных во внешней среде. Чтобы задействовать прогнозирующую модель на python реализован REST-сервис (FastAPI). Этапы передачи данных между Proficy CSense Architect и прогнозной моделью на python представлены на рисунке 8.

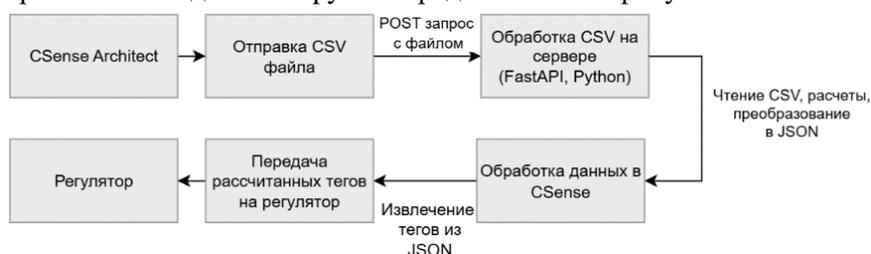


Рисунок 8 – Блок-схема этапов передачи данных между Proficy CSense Architect и прогнозной моделью на Python

Функцию регулятора принимающей тег выполняет блок нелинейной оптимизации. Результирующая конфигурация, организованная на базе блоков нелинейной оптимизации и прогнозной модели объекта, представляет собой СУУ ТП, способную в режиме реального времени определять оптимальные управляющие воздействия по прогнозируемым результатам.

Использование прогнозной модели процесса противоточной промывки продемонстрировало уменьшение объемной доли жидкости в пульпе КШ из-под промывателей противоточной промывки более чем на 3 % за счет корректировки расхода флокулянта (рисунок 9-13), и поддержание содержания щелочи на последнем этапе промывки не более 3,5 г/л (рисунок 14).

Внедрение прогнозной модели позволило сократить потери щелочи на 217 тонн в год за счет возврата 127 тыс. м³ оборотной воды, что стало возможным благодаря снижению Ж/Т на 3,98 %. График (рисунок 15) иллюстрирует неравномерность экономии NaOH: максимальные значения возврата (до 32,2 тонн/мес) наблюдаются в первом полугодии, в то время как во втором полугодии эффект в разы меньше. 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.

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 флокул из-под питающего стакана и

распределение флокул по размеру в процессе агрегации в питающем стакане в динамике и по его завершении с учетом возможной деагрегации флокул 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 обобщённая 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 прогнозных моделей 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Федорова, Э.Р. Разработка программного тренажера сгустителя красного шлама/ Э.Р. Федорова, В.В. Моргунов, **Е.А. Пупышева**// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2022, №5. стр. 10-18. DOI: 10.25791/asu.6.2022.1368.

2. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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. Pupyshcheva**, V.Morgunov// Symmetry. – 2024. – Vol. 16 (1). – Issue 114. – PP. 1-12. DOI: 10.3390/sym14112314.

4. Федорова Э.Р. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов/Э. Р. Федорова, **Е.А. Пупышева**, В.В. Моргунов// Цветные металлы. – 2023. – № 4. – С. 63-71. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.10.

5. Fedorova, E. Modeling of Particle Size Distribution in the Presence of Flocculant/E. Fedorova, **E. Pupyshcheva**, V.Morgunov// Symmetry. – 2024. – Vol. 16 (1). – Issue 114. – PP. 1-17. DOI: 10.3390/sym16010114.

Публикации в прочих изданиях:

6. Fedorova, E. Algorithm to distribute feed pulp between paralleled thickeners during red-sludge thickening and washing in alumina production/ E. Fedorova, N. Vasilyeva, **E. Pupyshcheva**// Journal of Physics: Conference Series/ – 2019– Vol. 1333. – Issue 4. – PP. 1-5. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/4/042007.

7. 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.

Том 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 404-405.

8. 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 – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2022. – С. 284-286.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619089 Российская Федерация. Программа для расчета гранулометрического состава агрегированной пульпы. Заявка № 2022618597: заявл. 13.05.2022: опубл. 19.05.2022/ Э.Р. Федорова, **Е.А. Пупышева**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683727 Российская Федерация. Программа для расчета средневзвешенного диаметра частиц. Заявка № 2022682966: заявл. 30.11.2022: опубл. 08.12.2022/ Э.Р. Федорова, **Е.А. Пупышева**, В.В. Моргунов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 1 с.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024614660 Российская Федерация. Программа для расчета релаксационной схемы осаждения металлургической пульпы в сгустителе. Заявка № 2024611647: заявл. 31.01.2024: опубл. 28.02.2024/ Э.Р. Федорова, **Е.А. Пупышева**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 1 с.

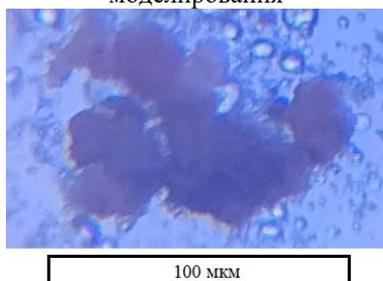
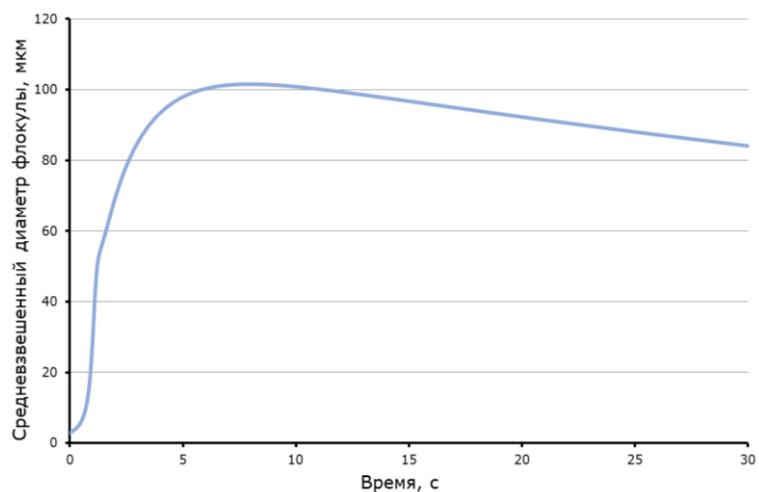
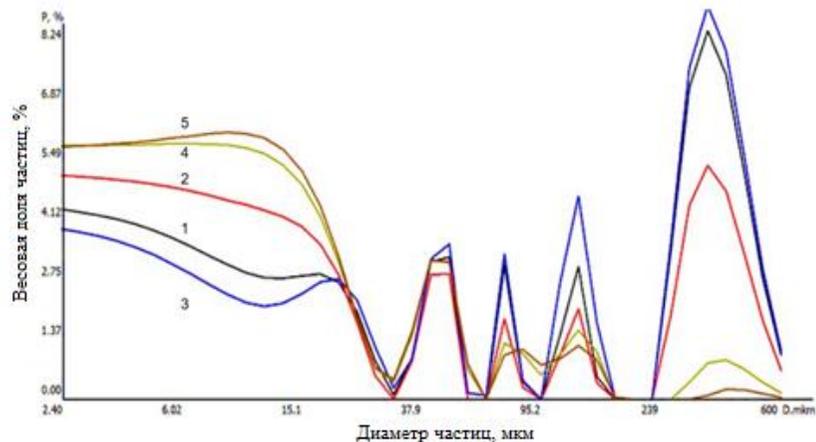


Таблица 1 – Таблица весовых долей частиц, соответствующих заданным значениям размеров частиц

№ опыта	Весовая доля частиц (P, %)																		
	0,0	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
1	0,0	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
2	0,0	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
3	0,0	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
4	0,0	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
5	0,0	3	5	10	15	20	30	50	70	80	90	100	150	200	250	300	400	500	600

Таблица 2 – Входные параметры математической модели агрегации КШ в присутствии флокулянта

Параметры	Значения	Диапазон	Ед. измерения
Концентрация флокулянта	0,08	0,05–0,80	кг/т
Концентрация твердых частиц в питании	43	30–150	г/л
Расход флокулянта	40	20–80	л/мин
Вязкость жидкой фазы	0,001	–	кг/м
Плотность частиц твердой фракции	3710	–	кг/м ³
Площадь поверхности частицы	8,61	–	м ² /мл
Плотность жидкой фазы	1240	–	кг/м ³
Диаметр стакана	3,20	–	м
Высота стакана	5,31	–	м
Время выполнения моделирования	30	–	с

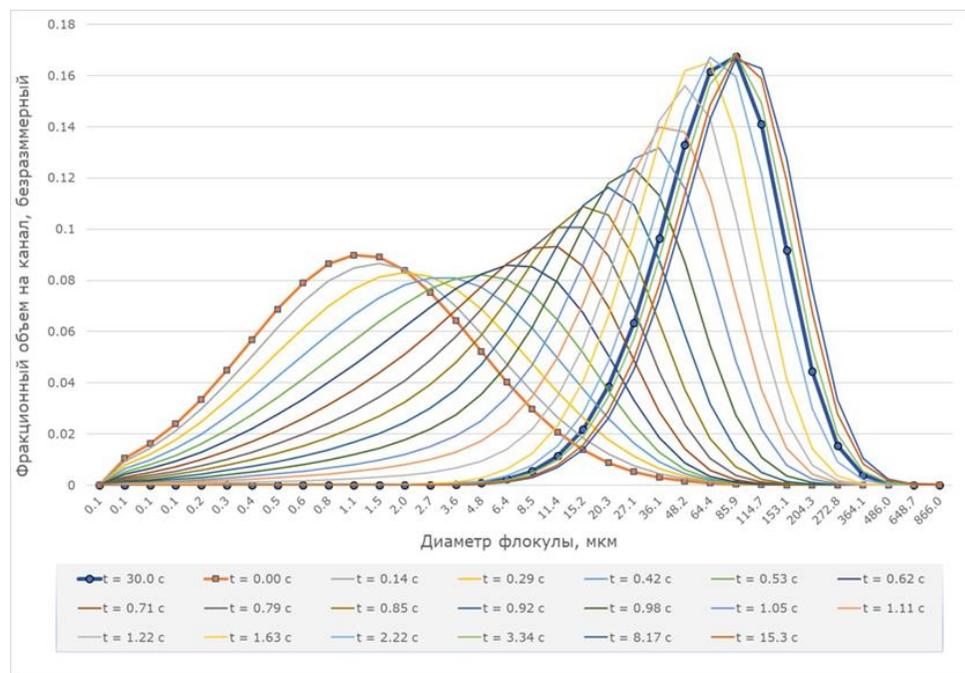


Таблица 3 – Результаты серии опытов по верификации математической модели агрегации и деагрегации КШ в присутствии флокулянта

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	95	84	113	109	75	107	86	99	81	101	109	104	86	124
Среднеквадратичное отклонение, мкм														
14														

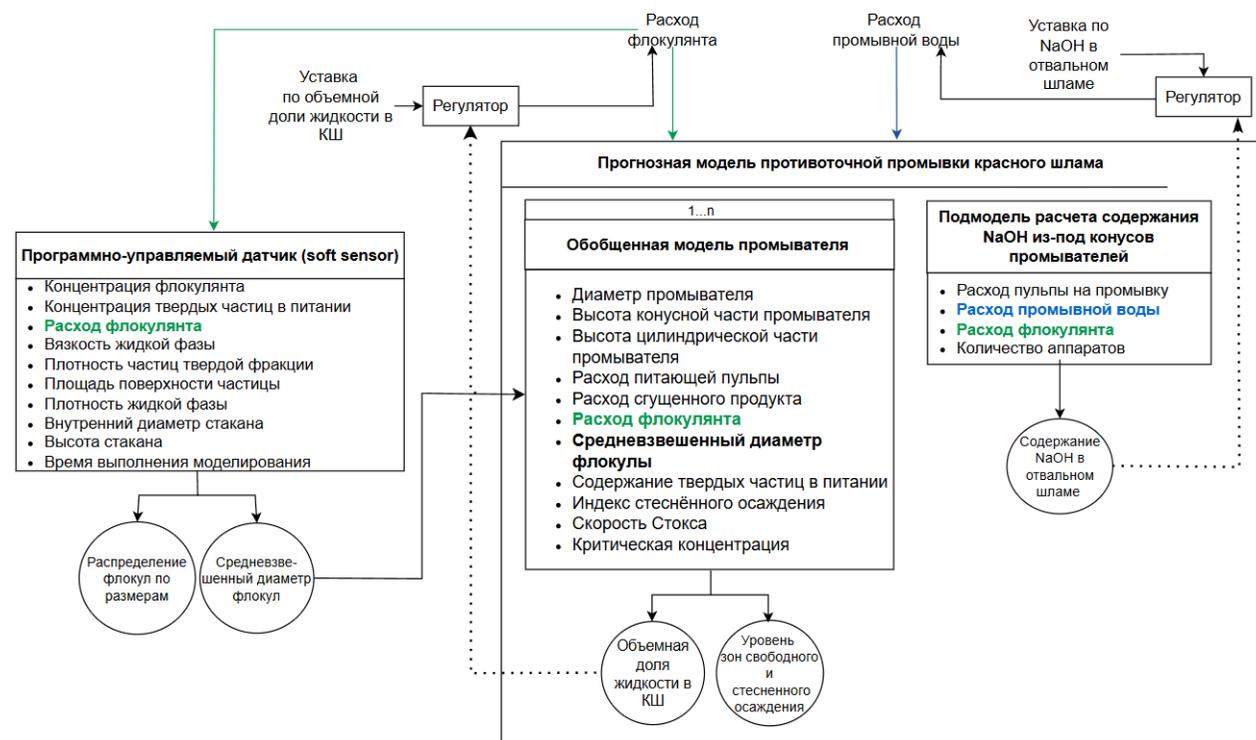


Рисунок 4 – Схема взаимосвязи модулей СУУ ТП: программно-управляемого датчика (soft sensor), обобщенных моделей промывателей (n = 5) и подмодели расчета содержания NaOH в составе прогнозной модели противоточной промывки

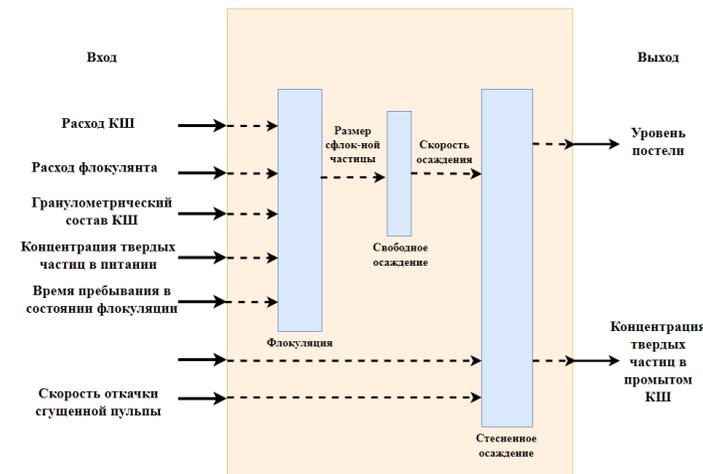


Рисунок 5 – Упрощенная схема обобщенной модели промывателя с входными и выходными параметрами

$$v_0 = \frac{g \cdot (\rho_S - \rho_L) \cdot d_{floc}^2}{18 \cdot \mu}, \quad (4)$$

где ρ_S , ρ_L – плотность твердой фазы и жидкой фазы соответственно, кг/м^3 ,
 d_{floc} – диаметр сфлуктурированной частицы на выходе из-под питающего стакана, м

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ,
 μ – вязкость жидкой фазы, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

$$\frac{d\varphi}{dh} = - \frac{\Delta\rho g}{f_{bk}(\varphi) \sigma'_e(\varphi)} \cdot (q\varphi + f_{bk}(\varphi) - q\varphi_{UF}), \quad (5)$$

где h – высота аппарата, м,
 $\Delta\rho = \rho_t - \rho_l$ – разность плотностей фаз, кг/м^3 ,
 $f_{bk}(\varphi)$ – коэффициент сопротивления среды, м^2 ,
 $\sigma'_e(\varphi)$ – производная эффективного напряжения, Н/м^2 ,
 $q\varphi$, $q\varphi_{UF}$ – потоки твердой и жидкой фаз соответственно, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$.

$$\sigma'_e(\varphi) = \sigma_0 c \frac{1}{\varphi_c} \left(\frac{\varphi}{\varphi_c}\right)^{c-1}, \quad \varphi \geq \varphi_c, \quad (6)$$

где σ_0 – начальное эффективное напряжение при $\varphi = \varphi_c$, Н/м^2 ,
 c – показатель, определяющий скорость роста напряжения с концентрацией, безразмерная величина,
 φ_c – критическая концентрация, после которой осадок начинает уплотняться, объемных долей %.

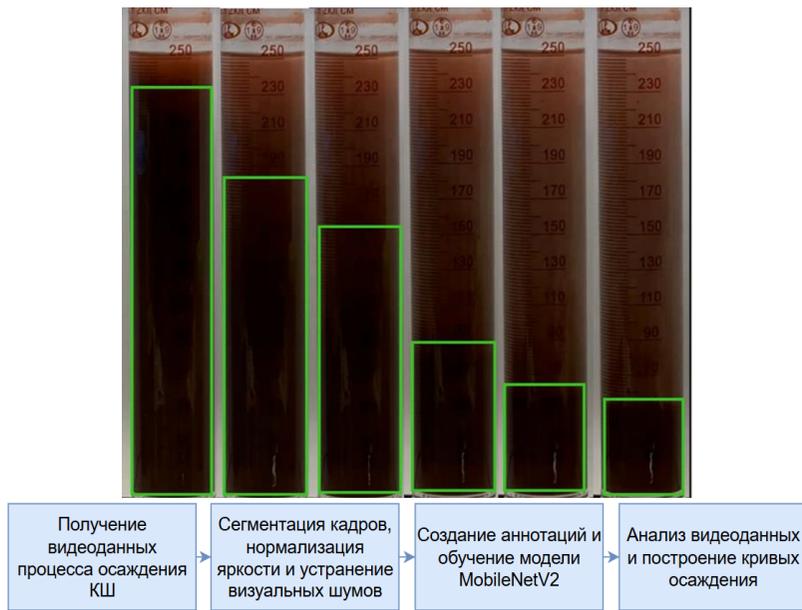


Рисунок 6 – Определение положения осажденной суспензии КШ

$$f_{bk}(\varphi) = \begin{cases} -\frac{\Delta\rho\varphi^2(1-\varphi)^2g}{\mu K(\varphi)}, & \varphi < \varphi_c \\ -\frac{k(\varphi)}{\mu} \Delta\rho\varphi^2g, & \varphi \geq \varphi_c \end{cases}, \quad (7)$$

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.

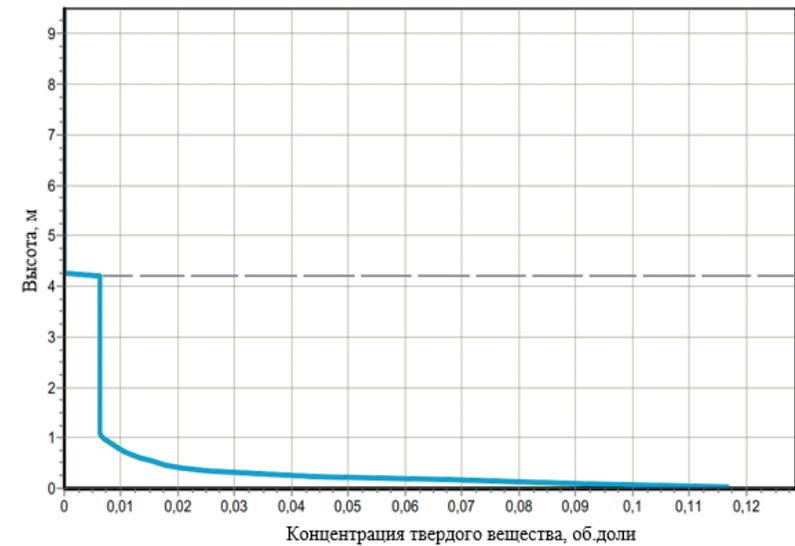


Рисунок 7 – Результат расчета обобщенной модели

Таблица 4 – Результат верификации обобщенной модели промывателя

№ 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				

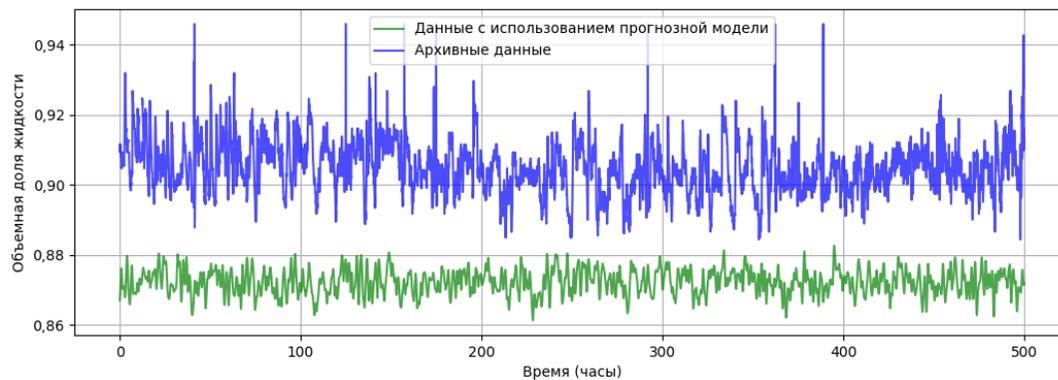


Рисунок 9 – Сравнение объемной доли жидкости из-под первого промывателя

Таблица 5 – Результат верификации подмодели расчета содержания NaOH

№ промывателя	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				

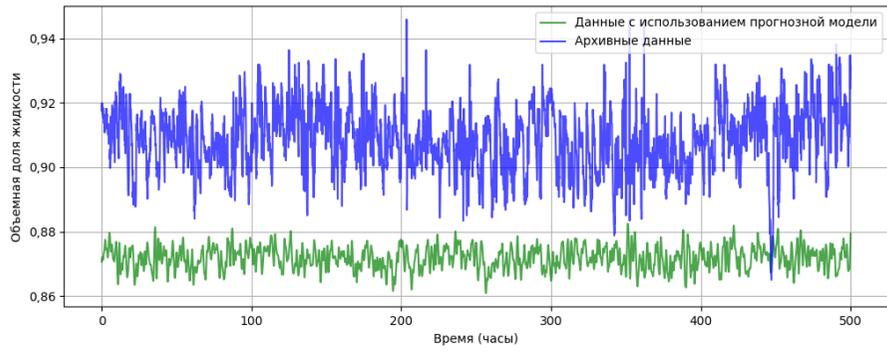


Рисунок 10 – Сравнение объемной доли жидкости из-под второго промывателя

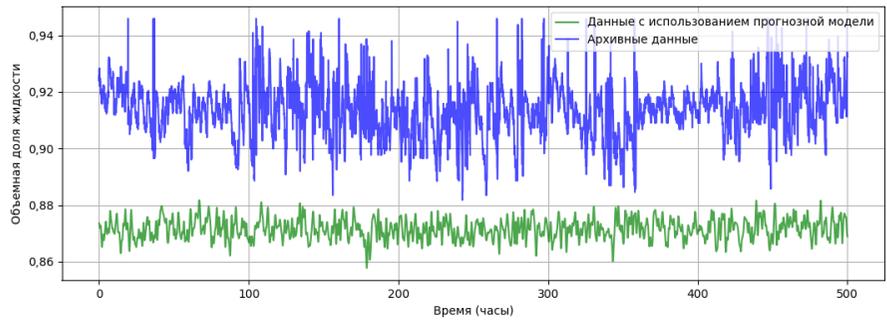


Рисунок 11 – Сравнение объемной доли жидкости из-под третьего промывателя

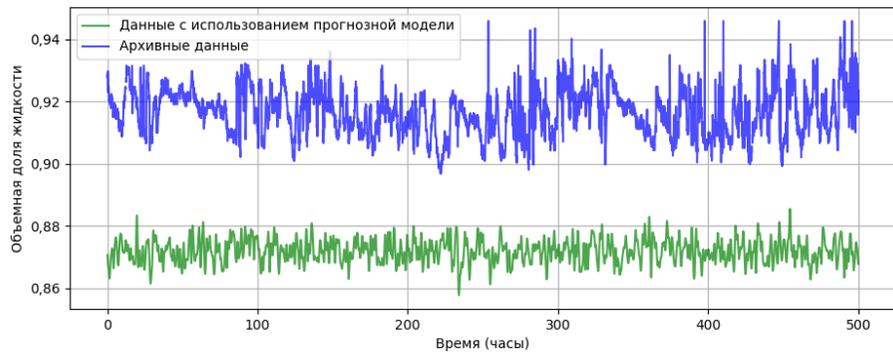


Рисунок 12 – Сравнение объемной доли жидкости из-под четвертого промывателя

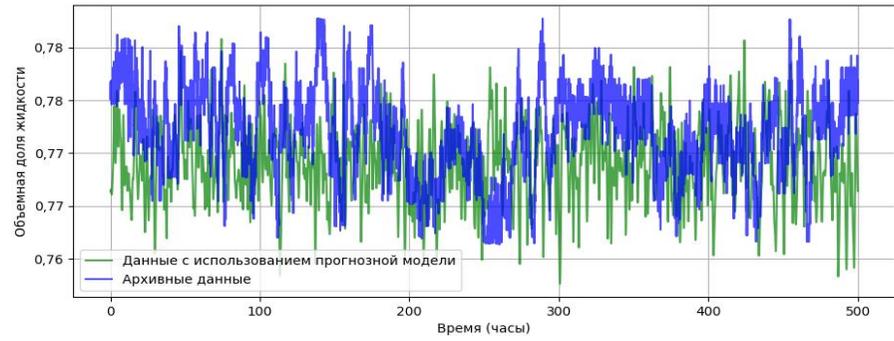


Рисунок 13 – Сравнение объемной доли жидкости из-под пятого промывателя

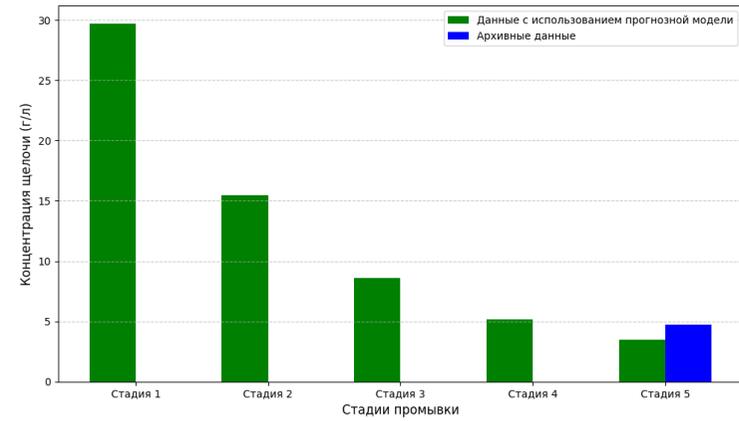


Рисунок 14 – Гистограмма результата работы прогнозной модели по параметру содержание щелочи из-под промывателей



Рисунок 15 – Годовая эффективность возврата щелочи в производство