

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»
д.т.н., профессор



М.Р. Филонов

20__ г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Пупышевой Елены Александровны на тему:
«Система усовершенствованного управления процессом противоточной промывки
красного шлама глиноземного производства», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. «Автоматизация и
управление технологическими процессами и производствами»

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность темы диссертационной работы Пупышевой Е.А. обусловлена необходимостью повышения эффективности и экологической устойчивости процессов переработки бокситов в глиноземной промышленности. Противоточная промывка красного шлама (КШ) является заключительным этапом технологии Байера и определяет степень возврата ценных компонентов (Na_2O , Al_2O_3) в производство, а также степень загрязнения окружающей среды.

Указанный процесс направлен на извлечение остаточных количеств щелочи и глинозёма из твёрдой фазы и характеризуется высокой инерционностью, нелинейностью и многосвязностью входных и выходных параметров. В современных условиях управления, основанных преимущественно на полуавтоматических схемах с активным участием оператора, эффективность промывки ограничена. Это выражается в недостаточной стабилизации процесса, увеличении потерь щёлочи и снижении степени извлечения ценных компонентов, что, в свою очередь, увеличивает нагрузку на шламохранилища и негативное воздействие на окружающую среду.

Дополнительные сложности создаются невозможностью прямого измерения важнейших параметров процесса, таких как средневзвешенный диаметр флокул на выходе из питающего стакана, границы раздела фаз, концентрация твёрдой фазы по высоте осадка. Существующие физические датчики не обеспечивают надёжной работы в

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-164 от 03.06.25
А.В. ВС

агрессивной среде промывателей, а лабораторные методы анализа имеют низкую оперативность и не могут быть использованы в реальном времени. Это делает актуальным развитие алгоритмов не прямой оценки параметров (программно-управляемый датчик), основанных на математических моделях.

Развитие подходов усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУ ТП), интегрирующих прогнозные модели и программно-управляемые датчики, позволяет преодолеть указанные ограничения. Внедрение СУУ ТП даёт возможность реализовать интеллектуальное управление на основе анализа текущего и прогнозируемого состояния системы, минимизировать участие оператора, стабилизировать режим работы оборудования, сократить расход реагентов и снизить содержание щёлочи в сбрасываемом шламе.

Таким образом, тематика диссертации соответствует приоритетным направлениям развития технологий цифровизации и интеллектуализации управления в гидрометаллургии, полностью укладывается в рамки специальности 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» и является несомненно актуальной как в теоретическом, так и в прикладном аспектах.

2. Научная новизна диссертации

Научная новизна диссертационной работы Пупышевой Е.А. заключается в разработке и обосновании новых подходов к построению усовершенствованной системы управления процессом противоточной промывки красного шлама глиноземного производства, базирующейся на использовании программно-управляемого датчика и прогнозной модели. В работе получены следующие новые научные результаты:

- Установлена зависимость средневзвешенного диаметра флоккул из-под питающего стакана промывателя от исходного гранулометрического состава пульпы красного шлама, что позволило перейти к косвенному определению данного параметра в реальном времени;
- Разработана математическая модель агрегации и деагрегации частиц красного шлама в присутствии флокулянта на базе уравнений популяционного баланса, позволяющая рассчитывать распределение частиц по размерам;
- Предложена структура усовершенствованной системы управления технологическим процессом (СУУ ТП) противоточной промывки КШ на базе интеграции программно-управляемого датчика и прогнозной модели, обеспечивающей возможность оперативного реагирования на изменения характеристик входного потока пульпы;
- Разработана и верифицирована прогнозная модель процесса промывки, обеспечивающая расчёт: высоты уплотнённого слоя в промывателе, распределения

концентрации твёрдой фазы по высоте, концентрации твёрдой фазы на выходе, содержания щёлочи в потоке с учётом внешних и внутренних возмущений.

– Получены патенты на программную реализацию указанных моделей (свидетельства о госрегистрации №2022619089, №2022683727, №2024614660), а также представлен акт внедрения результатов исследования в практическую деятельность компании АО «Моделирование и Цифровые двойники».

3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Теоретическое обоснование и математическое моделирование, использованные в диссертации, опираются на современные научные подходы, включая модель популяционного баланса для описания процессов агрегации и деагрегации частиц, а также методы численного прогнозирования на базе Python и специализированного ПО (GE Proficy CSense, Ansys Fluent). Разработанные модели отражают физическую природу процессов противоточной промывки красного шлама и адаптированы к особенностям объекта управления – радиальным однокамерным промывателям, что подтверждает их корректность и применимость.

Достоверность полученных результатов обеспечивается многоуровневой верификацией: сопоставлением результатов моделирования с лабораторными данными по гранулометрическому составу пульпы и флокул, архивными записями SCADA с действующего производства, а также прямыми испытаниями на опытных участках.

Разработанная прогнозная модель также прошла тестирование на специализированном ПО: было зафиксировано снижение доли жидкой фазы в промытом шламе более чем на 3 %, стабилизация содержания щёлочи в потоке, а также повышение устойчивости системы управления при колебаниях входного потока. Эффективность предложенных решений подтверждена актом внедрения от 12.03.2025, выданным компанией АО «Моделирование и Цифровые двойники».

Корректность и обоснованность выводов логически вытекают из поставленных задач и охватывают весь цикл исследования – от постановки проблемы и анализа существующих решений до построения моделей, их верификации и практического применения. Системный подход к структуре диссертации обеспечивает методическую завершённость каждого этапа. Предложенные алгоритмы контроля и управления подтверждены сопоставлением результатов численного моделирования, экспериментальных измерений и архивных производственных данных, что обеспечивает высокую степень достоверности научных положений и их соответствие реальным условиям эксплуатации.

4. Научные результаты, их ценность

Научная значимость диссертации Пупышевой Е.А. подтверждается её вкладом в развитие теории и практики интеллектуального управления технологическими процессами в гидрометаллургии. Разработанные в работе математические модели, алгоритм программно-управляемого датчика и структура усовершенствованной системы управления могут быть использованы в качестве основы для последующих исследований в области цифровизации, прогнозного управления и построения интеллектуальных SCADA-систем для технологических объектов высокой инерционности и сложности.

Результаты диссертационного исследования 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.

5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации

– 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).

6. Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные результаты могут быть рекомендованы к промышленному внедрению на глинозёмных предприятиях, использующих метод Байера, в частности, на объектах АО «РУСАЛ», АО «РУСАЛ УАЗ», АО «РУСАЛ Боксит Тимана», а также на других предприятиях, эксплуатирующих радиальные промыватели в цепочке противоточной промывки красного шлама. Результаты работы уже внедрены в деятельность компании АО «Моделирование и Цифровые двойники», что подтверждено соответствующим актом от 12.03.2025. Также разработанные модели могут быть использованы в научных центрах и университетах, занимающихся проблемами гидрометаллургии, автоматизации и цифрового моделирования, в том числе в рамках НИР на базе Санкт-Петербургского горного университета.

7. Замечания и вопросы по работе

– В работе для реализации программно-управляемого датчика предложено использовать модель популяционного баланса, адаптированную под процессы агрегации и деагрегации частиц КШ. Почему в качестве основы для виртуального измерения был выбран именно этот подход? Рассматривались ли альтернативные методы (например, машинное обучение, регрессионные модели или методы теории нечетких множеств)?

– Промывка КШ характеризуется нестабильностью параметров входного потока: изменяется гранулометрический состав, содержание твёрдого и т.д. Как в разработанной СУУ ТП учитываются эти колебания? Каким образом реализована адаптивность управления к изменяющимся условиям?

– В разделе 3.4.1 диссертации упоминается использование технологии машинного зрения для определения параметров осаждения в лабораторных условиях. Предусматривается ли использование машинного зрения как постоянного источника данных для коррекции прогнозной модели в производственной версии системы?

– В разделе, посвящённом расчётам материального баланса, указано, что использование модели позволяет избежать критических отклонений за счёт своевременной коррекции уставок, однако не конкретизирована процедура принятия решений оператором по данным модели. Возможно ли уточнить алгоритм или логику взаимодействия между прогнозной моделью и оператором при расхождении расчётов с текущими измерениями?

– По тексту диссертации встречаются отдельные опечатки и стилистические недочёты (на страницах: 25, 39). В частности, на стр. 25 имеются грамматические ошибки («Основным недостаток является...» вместо «Основным недостатком является...», «преимущество разделение» вместо «преимущество – разделение»), на стр. 39

используется дословный перевод термина soft sensor как «мягкий датчик» без пояснения, что может быть интерпретировано неоднозначно.

Вместе с тем указанные замечания, которые можно рассматривать и как пожелания в дальнейшей работе, не снижают общей положительной оценки, проведенных автором исследований в области автоматизации технологических процессов и разработки интеллектуальных систем управления промывкой красного шлама глинозёмного производства.

8. Заключение по диссертации

Диссертация «Система усовершенствованного управления процессом противоточной промывки красного шлама глиноземного производства», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета Екатерины II от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор **Пупышева Елена Александровна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.

Отзыв на диссертацию и автореферат диссертации **Пупышевой Елены Александровны** обсужден и утвержден на заседании кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», протокол № 6 от 27.05.2025 года.

Заведующий кафедрой автоматизированных систем управления

доктор технических наук



Тёмкин Игорь Олегович

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Почтовый адрес: 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1
Официальный сайт: <https://misis.ru/>
E-mail: kancela@misis.ru
Тел: +7 495 955-00-32