

На правах рукописи

Нгуен Хю Хоанг



**ЦИФРОВАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ
РАФИНИРОВАНИЕМ МЕДИ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами*

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

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Бажин Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

Лавров Владислав Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра теплофизики и информатики в металлургии, профессор.

Солёный Сергей Валентинович

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Институт киберфизических систем, кафедра электромеханики и робототехники, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится **26 сентября 2024 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, 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 26 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА

Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Электролитическое производство катодной меди является одним из самых энергоемких металлургических производств, а также имеет значительные затраты материалов. Это является одной из главных причин отсутствия производств для глубокой переработки медьсодержащих руд в странах с низким энергетическим потенциалом и дефицитом энергетических ресурсов. Основные проблемы связаны с несовершенством контроля и управления основными технологическими параметрами при электролитическом получении меди, влияющими на удельный расход электроэнергии, и приводящими к прямым потерям ценных металлов, которые концентрируются в электролитных шламах.

Основными причинами высокого расхода электроэнергии и неконтролируемого энергетического состояния электролитической ячейки является наличие поверхностных и дендритных образований на электродах, а также, шламовых осадков, приводящим к коротким замыканиям и резкому изменению содержания электролита и потерям ценных компонентов. В большинстве случаев данные отклонения фиксируются и контролируются во время периодических ручных замеров или методом визуального контроля. Существенные отклонения температуры электролита приводят к изменению сопротивления электролита в различных областях межэлектродного расстояния, способствуя активному формированию дендритов и последующему короткому замыканию между парами электродов в ванне. Значительное запаздывание в принятии решений для управляющего воздействия через систему АСУТП или при непосредственном устранении коротких замыканий или сливе шламового осадка снижают энергетическую эффективность процесса и приводят к уменьшению выхода по току.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями в области процесса электролитического рафинирования меди и повышения его эффективности занимались известные российские ученые Гальнбек А.А., Диомидовский Д.А., Шалыгин Л.М., Теляков Н.М., Белоглазов И.Н., Чухров М.В., Русинов Л.А., Цемехман Л.Ш.,

Худяков И.Ф., Набойченко С.С., Антропова Л.И., Дамаскин Б.Б., Левин А.И., Грейвер Т.Н., Мастюгин С.А., а также зарубежные ученые E. Wiechmann, Raub, E. Aqueveque, O. Devos, C. Gabrielli, Zhang J., Gerlach, E. Raub, Abrahams M.S. и др.

В настоящее время существуют передовые практики и технологии, связанные с разработкой автоматизированных систем управления в электролитическом производстве меди, которые разрабатываются в российских и зарубежных компаниях и институтах, таких как АО Русская медная компания - РМК, ПАО Норильский никель, Уральская горно-металлургическая компания - УГМК, Институт «Гипроникель», Санкт Петербургский горный университет, Южно-Уральский технический университет, а также в крупных горно-металлургических компаниях Southern Copper (Мексика), KazMinerals (Казахстан), Cuzco (Чили), Лаокай (Вьетнам) и др. Научно-практический интерес представляет распространение данного опыта, особенно в странах с большим запасом рудных материалов, содержащих медь, никель и цинк.

Актуальным является разработка системы дополнительного функционирования АСУ и алгоритма контроля состояния электродов и уровня накопленного осадка с применением современных приборов и датчиков, встроенных в систему цифрового двойника. Это обеспечит быструю и точную передачу данных системе автоматизации электролиза меди для своевременных управляющих воздействий.

Объект исследования – система автоматизированной управления процессом электролитического рафинирования меди.

Предмет исследования – подсистема управления и контроля состояния и наличия дендритных и шламовых осадков в электролизных ячейках при получении катодной меди.

Цель работы – снижение расхода электроэнергии процесса электролитического рафинирования меди, повышение извлечения полезных компонентов при снижении количества замыканий электродов и дендритных и шламовых осадков.

Идея работы – заключается в установке дополнительных позиций контроля, для расширения базы данных и создания цифровой системы мониторинга, направленной на повышение управляемости процесса электролитического рафинирования меди при снижении потерь электроэнергии.

Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие **задачи исследования:**

1. Провести аналитическое исследование передовых практик и изучить техническое состояние систем АСУ ТП в электролитическом рафинировании меди.

2. Определить условия для функционального расширения функций системы контроля температуры электролита, состава электролита, межэлектродного расстояния, в зависимости от уровня шламовых осадков, и за счет ввода дополнительных параметров.

3. Разработать алгоритм контроля для последующей ликвидации дендритных образований между электродами во время процесса электролитического рафинирования меди на основе цифрового двойника для обеспечения устойчивой работы электролитической ячейки, и для оперативных управляющих воздействий.

4. Обосновать выбранные дополнительные параметры контроля для ввода их в структуру АСУТП электролитического получения катодной меди в условиях ограничения амперной нагрузки.

Научная новизна работы:

Установлены связи между ростом площади и объемом дендритных замыканий между электродами электролизной ячейки в зависимости от состава электролита и его температуры при заданном межэлектродном расстоянии.

Определена скорость роста уровня донных шламовых осадков в электролитической ячейке при различных технологических параметрах, которая зависит от количества и объема ликвидированных дендритных образований, сформировавшихся в контролируемый промежуток времени.

Разработана модель цифрового двойника для определения высоты осадка, позволяющая после измерений задавать время слива шлама, обеспечивая при этом снижение удельного расхода электроэнергии на 12-15%.

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (п.2,3,8).

Теоретическая и практическая значимость работы:

Разработан и обоснован алгоритм контроля и управления процессом электролитического рафинирования меди, включающий контроль дополнительных параметров, позволяющий локализовать место коротких замыканий на электродах и сократить время их устранения в 3 раза.

Реализованы в промышленных условиях программные продукты для контроля основных параметров процесса рафинирования катодной меди в электролизных цехах (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022614039 и №2023665289), которые апробированы в условиях действующего производства на типовых электролизных цехах АО «Новгородский металлургический завод» и Медеплавильный завод «Лаокай» во Вьетнаме;

Получен акт о внедрении результатов диссертационного исследования, подтверждающий внедрение результатов кандидатской диссертации в АО «СоюзЦМА» для систем АСУ ТП электролиза (№1/23 от 12.04.2023) и Медеплавильного завода «Лаокай» (Институт горной науки и технологии Вьетнам) во Вьетнаме (№1 от 15.04.2024).

Методология и методы исследований.

Исследование проведено при помощи методов научного обобщения, анализа литературных источников и патентных материалов. Эти методы позволили выявить направления развития систем контроля и управления ключевыми параметрами процесса электролитического рафинирования меди. За счет включения в систему АСУ дополнительных приборов и датчиков проведена модернизация системы автоматизации и управления технологическими процессами. В диссертационной работе

использовались данные, предоставленные «Медеплавильным заводом» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам). Также получена кинетическая модель процесса рафинирования меди с учетом изменения сопротивления шлама на дне ванны в условиях постоянного расхода электролита. Обработка и анализ результатов исследований, проводились стандартными методами статистики с использованием программного пакета Python. Математическое моделирование процессов, протекающих в электролитической ячейке, выполнялось с использованием компьютерных программ Rhino 7, STAR C++ и UNITY Pro XL от Schneider Electric.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Система тепловизионного контроля оборудования позволяет определить объем и место дендритных осадков на электродах электролитической ячейки, и обеспечивает сокращение времени устранения коротких замыканий в 3 раза.

2. Контроль объема и уровня донных шламовых осадков в электролитической ячейке снижает расход электроэнергии на 12-15% при увеличении степени извлечения полезных компонентов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается применением современных методов статистического анализа, сходством теоретических и экспериментальных результатов, тестированием системы управления на промышленных архивных данных о протекании технологического процесса электролитического рафинирования меди.

Апробация результатов. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на: XVI Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 31 мая – 06 июня 2021 г.); II Международной конференции «CAMSTech-II 2021: Современные достижения в области материаловедения и технологий», (Красноярск 29-31 июля 2021 г.); Международном симпозиуме «Нанопластика и Наноматериалы» НиН-2021 г., (Санкт-Петербург 24-25

ноября 2021 г.); Международной научной конференции, посвященной 80-летию С. С. Набойченко, (Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.).

Личный вклад автора состоит в постановке цели, формулировке задач и разработке методологии исследования; в проведении анализа научно-технической литературы и патентного поиска; в выполнении исследований; в разработке технических решений, адаптированных к условиям действующего производства электролитического рафинирования меди; в научном обобщении полученных результатов и подготовке публикаций.

Публикации по работе. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 1 статье в издании 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, в 2-х статьях в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы из 111 наименований, четырех приложений. Диссертация изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность своему научному руководителю, профессору, доктору технических наук, заведующему кафедрой металлургии Владимиру Юрьевичу Бажину.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы общая цель и задачи работы, а также научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполненного исследования представлены особенности технологического процесса производства меди, проведена

аналитическая оценка существующих технологий, и подробно рассмотрены этапы электролитического рафинирования катодной меди. Особое внимание уделено анализу и состоянию систем автоматизированного управления технологическим процессом в электролизных цехах, и выявлены их недостатки. Изучены существующие тенденции и направления использования цифровых двойников в металлургии цветных металлов.

Во второй главе представлены методы исследования и обработки полученных результатов. Разработан алгоритм и программа для обнаружения и контроля образования дендритов, приводящих к коротким замыканиям между электродами, с помощью тепловизионной камеры. На основе существующего уровня техники обосновано внедрение систем тепловизионного контроля для регистрации, обработки изображений для обнаружения мест коротких замыканий, которые выполняются с помощью программного обеспечения, созданного на языке программирования Python.

В третьей главе представлены результаты исследования обработки данных, полученных в ходе эксперимента с использованием цифрового двойника, для определения влияния дендритов в процессе их образования, на изменения сопротивления и содержания электролита, приводящем к коротким замыканиям между электродами. Разработан метод регистрации точного местоположения, количества и объема этих коротких замыканий по всей площади электродов электролитических ванн, позволяющий оператору системы автоматического управления оценивать текущее состояние и управлять работой электролизного цеха.

В четвертой главе обоснована разработанная структура системы контроля и представлен алгоритм управления основными параметрами электролитического рафинирования меди, а также показано устойчивое функционирование систем автоматического контроля и регулирования работы серии электролизеров на всех уровнях управления. Разработан способ цифрового автоматизированного контроля основных параметров электролитического рафинирования меди при помощи программного

комплекса UNITY Pro XL от компании Schneider Electric. Рассчитана экономическая эффективность предлагаемого технического решения.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты проведенного исследования.

Основные результаты отражены в следующих **защищаемых положениях**:

1. Система тепловизионного контроля оборудования позволяет определить объем и место дендритных осадков на электродах электролитической ячейки, и обеспечивает сокращение времени устранения коротких замыканий в 3 раза.

Процесс электролитического рафинирования меди с целевыми входными параметрами, такими как температура электролита, содержание серной кислоты в электролите $C_{H_2SO_4}^{эл}$, содержание сульфата меди в электролите $C_{CuSO_4}^{эл}$, содержание меди в электролите $C_{Cu}^{эл}$ имеет в сочетании с электрическими параметрами (сила тока, напряжение), и ряд неконтролируемых значений. Выходными параметрами являются выход по току катодной меди η_{Cu} и производительность электролизера по массе катодной меди, полученной после обдирочных машин - $Пр_{Cu}$.

Управляющими воздействиями являются параметры, связанные с контролем катодной плотности тока D , и скорости циркуляции электролита V , что является не достаточным для качественного управления процессом. Математическая модель процесса электролиза, учитывая предыдущие модели, описывается уравнениями (1) и (2)

$$\eta_{Cu} = 885,32 + 0,018 \cdot V + 0,0104 \cdot D^2 - 5,792 \cdot D + 1,43 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{H_2SO_4}^{эл})^2 - 0,013 \cdot C_{H_2SO_4}^{эл} + 0,09 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{Cu}^{эл})^2 - 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot C_{Cu}^{эл} + 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{CuSO_4}^{эл})^2 - 0,0758 \cdot C_{CuSO_4}^{эл} \quad (1)$$

$$Пр_{Cu} = -122,66 + 0,014 \cdot V - 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot D^2 + 1,30096 \cdot D + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{H_2SO_4}^{эл})^2 - 0,0963 \cdot C_{H_2SO_4}^{эл} + 4,4 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{Cu}^{эл})^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot C_{Cu}^{эл} + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{CuSO_4}^{эл})^2 - 0,0429 \cdot C_{CuSO_4}^{эл} \quad (2)$$

где, η_{Cu} – оценка планируемого выхода по току, Pr_{Cu} – показатель диагностики производительности электролизёра.

Результаты моделирования для определения и обоснования основных функций цифрового двойника представлены в виде изменения производительности и выхода по току при варьировании значений плотности тока, который в частности зависит от наличия и объема дендритных отложений и налипаний на поверхности электродов (рисунок 1,2).

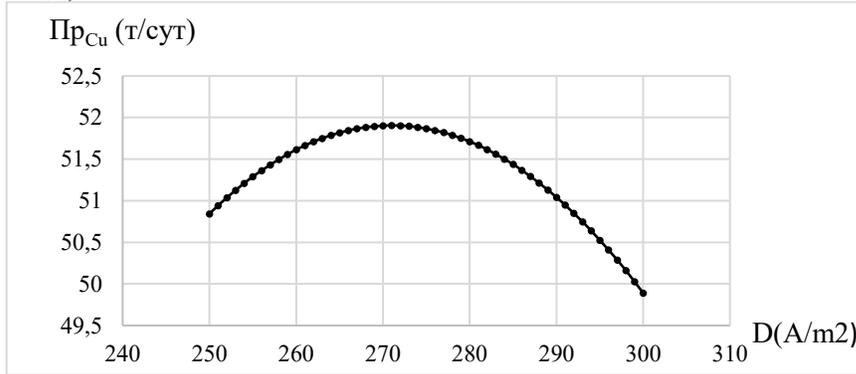


Рисунок 1 - Изменение производительности электролизной ванны при изменении плотности тока

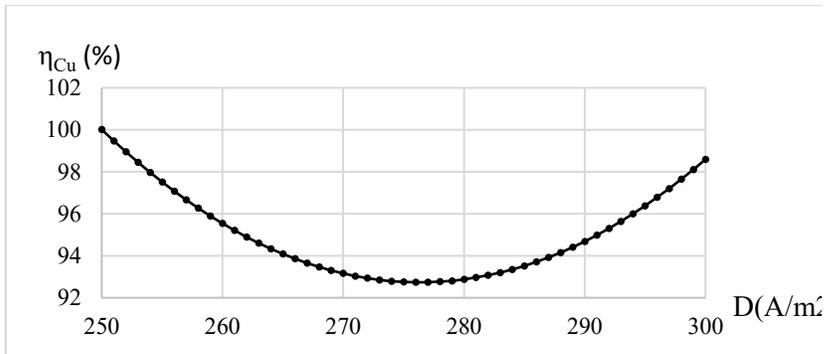


Рисунок 2 - Изменение выхода по току при изменении плотности тока

Плотность электрического тока, как основной параметр имеет прямую зависимость от расстояния между электродами в электролизере (МЭП). Для достижения оптимальных значений плотности тока в сочетании с высокими энергетическими показателями (низкое значение удельного расхода электроэнергии), выбирается межэлектродное расстояние в пределах 4-5 см (рисунок 3). При этом, проблемой является факт, что при уменьшении расстояния между анодом и катодом до минимальных значений происходит возникновение ряда коротких замыканий между ними. На поверхности катода неконтролируемо формируются дендриты, что резко снижает на данном участке расстояние между катодом и анодом. Начавшийся рост локальных дендритов на фоне растущего сопротивления электролита, при уменьшении содержания металлизированных фаз и ионов меди, в конечном итоге приводит к более длительному короткому замыканию.

Для изучения процесса образования дендритов была использована лабораторная электролитическая ячейка в уменьшенном масштабе по сравнению с промышленной ванной, связанная через ПО с цифровым двойником. Разработан способ обнаружения дендритных осадков и метод своевременного их удаления во время электролиза с помощью тепловизора Opttris PI200, встроенного в систему цифрового двойника, который располагается над электролизной ячейкой, и связан с объективом камеры вниз перпендикулярно верхней части ванны (электролизной ячейки) (рисунок 4).

Для автоматизации процесса обнаружения и регистрации короткого замыкания с помощью тепловизора, изображение ячейки для проверки должно быть зарегистрировано по таймеру в момент реального времени, причем, с самого начала его обнаружения при дендритном срастании, до полной ликвидации. Алгоритм обнаружения и идентификации по информационным признакам требует, чтобы ИК-изображение ячейки было зафиксировано при наведении камеры на объект и его контуры выше текущего распределителя (промежуточной шины), когда шина находится между двумя ячейками. Причина такого

захвата изображения, при котором отображаются две ячейки, состоит в том, что это облегчает обнаружение отклонений (перегрев катода, повышение температуры электролита, объем срастания осадка, площадь теплового контура при замыкании и т.д.). (рисунок 5 и 6).

В действующем производстве катодной меди (цех электролиза меди на медеплавильном заводе Лаокай (Вьетнам)) тепловизионная камера установлена на технологическом кране, и расположена в направлении к верхней поверхности ряда электролизных ванн. Камера одновременно захватывает изображения от 2 до 4 электролизеров. Данные передаются на SCADA-систему через разработанное программное обеспечение. После обработки данных изображений (формирование Базы Данных - БД) определяется местоположение короткозамкнутой пары электрода, время начала образования, его объем перед ликвидацией (очисткой электрода).

Ячейка в данном случае расположена в поле общего изображения, прежде чем будут обнаружены места короткозамкнутых катодов для фиксирования времени начала и скорости роста площади, температуры электролита показывает интервал необходимого времени и достаточного для захвата изображения в режиме реального времени.

Алгоритм обнаружения и регистрации нарушения включает в себя следующие три основных стадии: 1) Поиск исходных точек и линий для электролитической ячейки (от центральной оси до промежуточной переходной шины) (рисунок 7). 2) Нахождение месторасположения участка и номера катодов на общей матрице ячейки. (Рисунок 8). 3) Поиск короткозамкнутых электродов с использованием порогов для последующей идентификации и причин образования замкнутых участков по результатам обработки данных изображения по площади с пересчетом на объем ячейки и электролита (с учетом плотности осадка). (рисунок 9).

Пример изображения участка с нанесенным покрытием доказывает, что алгоритм обнаружения и идентификации ИК-изображения успешно определяет местоположение и характеристики самого замыкания. В зоне перегрева температура поверхности электрода

составила 160°C, а $T_{эл}$ в зоне максимального нагрева достигла 92°C. Площадь замыкания составила 14–18 см² (2,2% от всей контролируемой поверхности, которая увеличивалась со скоростью 2,4 см²/мин). Полученные данные переносятся в АСУ ТП для принятия решения по управляющему воздействию о мгновенном разрушении (ликвидации) срастания между электродами. Таким образом, в комплексе с тепловизором созданный объект контроля и идентификации состояния электролизной ячейки работает как цифровой двойник, включая функции прогноза будущей технологической ситуации по полученным ранее данным в БД.

В ходе эксперимента в электролизном цехе использовалась тепловизионная камера для сравнения уровня эффективности с традиционными методами с точки зрения уровня и качества контроля, определяется место короткого замыкания и объем дендритов, а также регистрируется продолжительность (тайминг) технологического процесса. При изменении температуры электролита регистрируется ее значение за весь промежуток времени дендритного образования. После ликвидации и очистки электрода проверяется и корректируется рН электролита.

Таким образом, через сканирующие тепловизоры, как элемент цифровой системы контроля, можно обнаружить любые короткозамкнутые катоды и зафиксировать по таймеру начало отклонения и скорость роста площади. Расположение катодов по умолчанию используется для определения количества коротких замыканий и дает адекватный результат по измерению температуры электролита и площади самого замыкания. Время обнаружения и ликвидации отклонений при использовании данной системы снижается в 3 раза (Таблица 1).

2. Контроль объема и уровня донных шламовых осадков в электролитической ячейке снижает расход электроэнергии на 12-15% при увеличении степени извлечения полезных компонентов.

Создание виртуальной модели электролизера для определения влияния количества шламового осадка на качество самой катодной меди и на основные параметры процесса электролиза должно в значительной степени повысить эффективность процесса, то есть увеличить выход по току, снизить удельный расход электроэнергии и уменьшить потери благородных и редких металлов. В рамках исследования было проведено моделирование электролизера с целью определения влияния осадка на дне ванны на качество меди и основные параметры процесса электролиза. (Рисунки 12,13).

В период регистрации и определения высоты осадка (шлама) на примере выделенной ячейки, когда объем превышает предельное значение, наблюдается быстрое образование дендритов в нижней части электродов. Это приводит к возникновению короткого замыкания между электродами и осадком в нижней части ванны, что резко увеличивает расход электроэнергии.

Таким образом, установлено, что в ходе технологического процесса необходим контроль и анализ текущих изменений во всем объеме электролитической ячейки для некоторых параметров, причем, это необходимо делать с учетом дополнительных условий и параметризации контроля в стандартной системе АСУ: 1) Содержание меди в электролите и серной кислоте при контроле pH- среды; 2) Температура электролита в ходе процесса; 3) Скорость циркуляции электролита; 4) Напряжение между анодом и катодом, и сила тока в цепи; 5) Плотность тока на электродах; 6) Уровень шлама при контроле поплавковым погружным датчиком; 7) Концентрация хлорид-иона в электролите; 8) Транспортирование части рабочего электролита и его передача на слив; 9) Перемешивание электролита после нескольких стадий циркуляции по емкостям обслуживания и хранения; 10) Расход пара и давление; 11) Непрерывная добавка серной кислоты и сульфата меди в электролит; 12) При вводе в электролит серной кислоты нужен контроль концентрации электролита отработанной промывной водой и конденсатом; 13) Катодная плотность тока, и ее регулирование по сопротивлению электролита; 14) Загрузка и установка анодов из

черновой меди через определенное расстояние, и контроль времени их растворения в результате электролиза.

С учетом этого, необходим анализ взаимосвязи между всеми рабочими параметрами, который указывает на необходимость уточнения и ввода дополнительных данных, таких как, содержание ионов меди, уровень электролита и объем шламового осадка.

Все системы контроля и управления производством должны учитывать входные технологические параметры, обеспечивающие высокое качество и чистоту выпускаемой продукции – катодной меди. При электролитическом рафинировании меди отсутствует наличие функциональных связей между количеством образующегося катодного осадка (шлама) и количеством и объемом дендритных нарастаний и замыканий на электродах, особенно после их разрушения, что приводит к изменению содержания ионов меди в электролите.

На основании вышеперечисленных факторов создана программа для ЭВМ, позволяющая более эффективно контролировать технологические характеристики электролиза меди. На рисунке 14 показан алгоритм работы программы.

На алгоритме приняты следующие обозначения

1. Начать процесса (ввод параметров в Базу Данных)
2. Проверить время процесса τ (мин.), и окончательный тайминг
3. Сбор данных: Напряжение U (V); Температура электролита t ($^{\circ}\text{C}$) в ванне; Уровень шлама $H_{\text{ш}}$ (м); Уровень электролита $H_{\text{э}}$ (м); Концентрация серной кислоты в электролите $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$)
4. Проверка параметра: находится ли Температура электролита в допустимых пределах $t, < 85^{\circ}\text{C}$
5. Проверка параметра: имеет ли напряжение между электродами в необходимом значении $U = 0,314 \text{ В}$
6. Проверка параметра: контроль уровня шлама в допустимых пределах $H_{\text{ш}} < 0,4 \text{ м}$ (нет замыкания в нижней части электрода)
7. Проверка уровня электролита в электролизере в пределах $H_{\text{э}} < 1 \text{ м}$
8. Проверка параметра содержания $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$) в электролите в пределах $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} < 150 \text{ г}/\text{л}$

9. Начало сканирования тепловизором по поверхности ячейки (ванне).
10. Определение зоны перегрева электролита (с короткими замыканиями). Указать на экране номера катода и анода.
11. Устранить короткое замыкание и зафиксировать время (тайминг).
12. Регулирование напряжение до заданного значения.
13. Направление шлама на слив в приемник.
14. Добавка электролита до заданного целевого уровня.
15. Добавка серной кислоты в электролит до целевого значения концентрации.
16. Отчет о процессе изменения параметров электролиза отображается на экране
17. Завершение процесса корректировки параметров электролиза.
18. Стабилизация процесса и вывод на нормальный технологический режим

В результате, в ходе изучения проблем устойчивой работы электролизных ячеек, была создана система контроля и управления основными параметрами процесса производства катодной меди (рисунок 10). В состав программного обеспечения входят следующие продукты:

Программное обеспечение было разработано в среде Unity XL Pro от компании Schneider Electric и русифицировано для применения в среде SE (System Electric) по следующему алгоритму (рисунок 11): 1) блок питания BMXCPS3500; 2) процессорный модуль Modicon M580 P58 2040; 3) модуль дискретных входов BMXDDI 1602, количество число дискретных входов:16; 4) модуль аналогового входа-вывода BMXAMM0600, количество число дискретных входов: восемь в соответствии с EN/IEC 61131-2; 5) модуль дискретных выходов BMXDDO 1602, количество число цифровых входов:16.

В ходе работы доказано, что интенсификация процесса электролиза происходит в основном за счет повышения значения плотности тока, и улучшения работы системы циркуляции электролита для поддержания постоянной концентрации ионов меди при стабилизации температуры электролита в заданных пределах.

Обоснована необходимость внедрения датчиков уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь при отсутствии замыканий дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера и для дополнительного контроля за ходом протекания технологического процесса. Построены модели формирования катодного осадка (шлама) и дендритных замыканий на электродах. Анализ возможных проблем и отклонений, связанных с образованием шламового осадка, дал возможность смоделировать ряд производственных сценариев.

Разработанный алгоритм управления и программа ЭВМ для дополнительных действий в системе АСУТП позволяет снизить энергетические потери (на 10-15%) и повысить выход по току на 2%. Данные разработки будут полезны для внедрения в существующие системы АСУ ТП электролитического рафинирования меди для предприятия «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

Диссертационная работа выполнена на кафедре АТПП и в Центре Цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета, работа относится к направлению «Энергосберегающие технологии».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научная задача – снижение расхода электроэнергии процесса электролитического рафинирования меди и увеличение извлечения полезных компонентов путем использования дополнительных параметров контроля в системе автоматизированного управления.

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведенное аналитическое исследование процесса электролитического рафинирования меди указывает на необходимость поиска новых функциональных связей с учетом обоснования дополнительных контролируемых параметров процесса (состав и температура электролита, температура электродов, скорость циркуляции

электролита, высота шлама на дне ванне) для обеспечения снижения энергетических потерей (на 10-15%).

2. Основываясь на результатах экспериментов на электролитической установке при обнаружении дендритных отложений при помощи цифрового двойника установлены критерии для своевременного устранения коротких замыканий между электродами в МПР.

3. Обосновано использование алгоритма для определения места, времени и количества коротких замыканий в электролизере с помощью тепловизионной камеры на основе разработанного программного комплекса (программа ЭВМ №2022614039). Повышение экономической эффективности процесса электролиза меди в электролизере достигается за счет ограничения появления коротких замыканий и минимизации сопротивления шламов качеству катодной меди и содержанию редких металлов, которые могут найти применение на действующем производстве.

4. Разработан программный пакет (программа ЭВМ №2023665289), который в рамках расширения функций АСУ ТП позволяет повысить производительность электролитического рафинирования меди на 10-15% за счет контроля основных параметров процесса.

Направлением дальнейшего развития темы исследования может стать расширение контролируемых цифровым двойником параметров для более точного моделирования процесса электролитического рафинирования меди. Еще одной важной областью является интеграция систем искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных и принятия решений в реальном времени.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Хоанг Н.Х., Бажин В.Ю. Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования

меди. Известия вузов. Цветная металлургия.. 2023;(3):5-16.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-3-5-16>

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

2. **Nguyen, H.H.**, Bazhin, V.Y. Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation. Metallurgist (2023). DOI 10.1007/s11015-023-01487-3.

3. Bazhin V. Yu., Masko O. N., **Nguyen Huy H.** Increasing the speed of information transfer and operational decision-making in metallurgical industry through an industrial bot. Non-ferrous Metals 1(1):62-67 (2023) DOI: 10.17580/nfm.2023.01.10

4. Bazhin V. Yu., **Nguyen H. H.** Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems //AIP Conference Proceedings. Vol. 2467. No. 1. AIP Publishing LLC, 2022. DOI: 10.1063/5.0092750

Свидетельства:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023665289 Российская Федерация. Программа цифрового автоматизированного контроля основных параметров процесса рафинирования катодной меди: № 2023663835: заявл. 03.07.2023: опубл. 13.07.2023 / **Х. Х. Нгуен**, В. Ю. Бажин, М. А. Пилипушко; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022614039 Российская Федерация. Программа цифрового автоматизированного контроля процессом электролитического рафинирования меди: № 2022613110: заявл. 10.03.2022: опубл. 16.03.2022 / **Х. Х. Нгуен**, В. Ю. Бажин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Категория	Алгоритм обнаружения (с тепловизионной камерой)	Ручной
Количество ячеек	96	96
Количество катодов	5664	5664
Короткое замыкание	75	75
Короткое замыкание с высокой температурой	27	55
Дендритные осадки	45	22
Время проверки 1 ячейки	~1 мин	~3 мин
Время проверки всего цеха	~100 мин	~300 мин

Таблица 1 – Результат проверки 96 электролизеров с использованием алгоритма обнаружения



Рисунок 4 – Электролитическая установка для обнаружения дендритных осадков

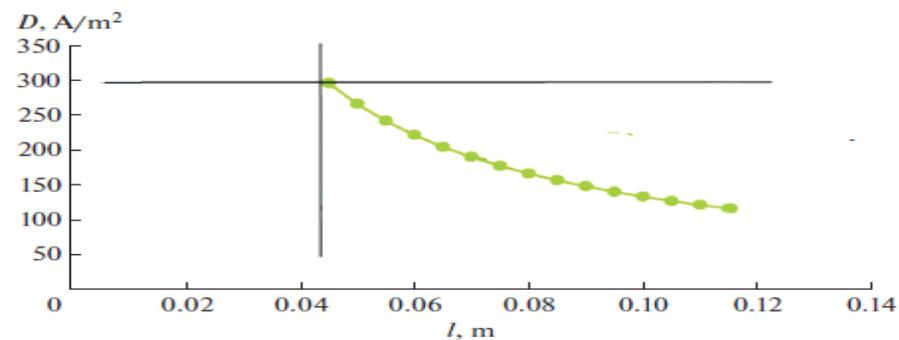


Рисунок 3 – Зависимость плотности тока от межэлектродного расстояния

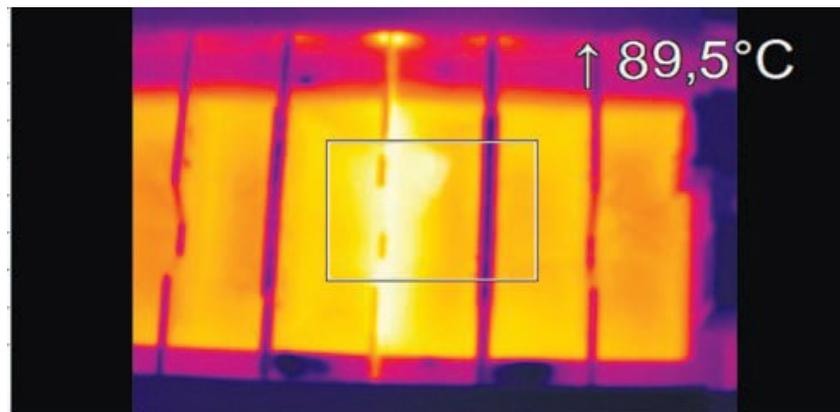


Рисунок 5 – Изображение локального образования дендритного осадка на мониторе цифрового двойника

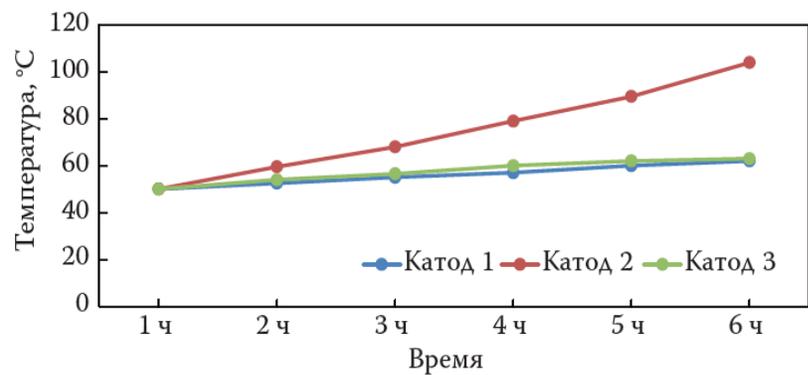


Рисунок 6 – Температура катодов во время электролиза

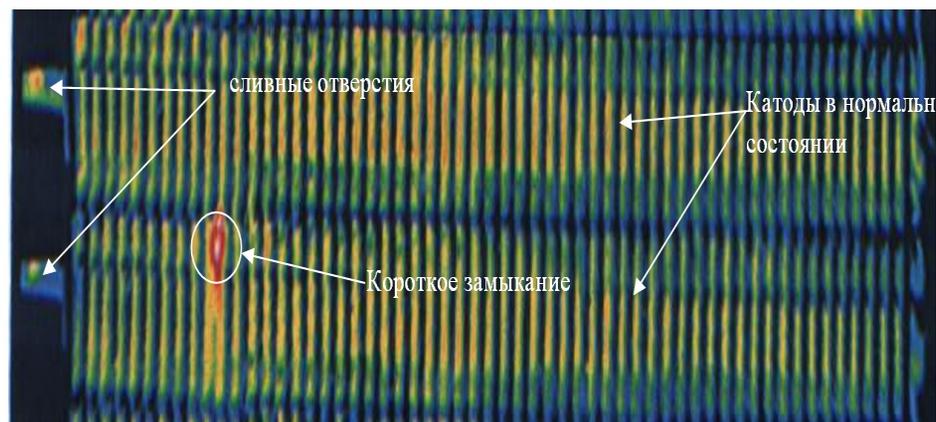


Рисунок 7 – Изображение ячейки, захваченное в режиме реального времени

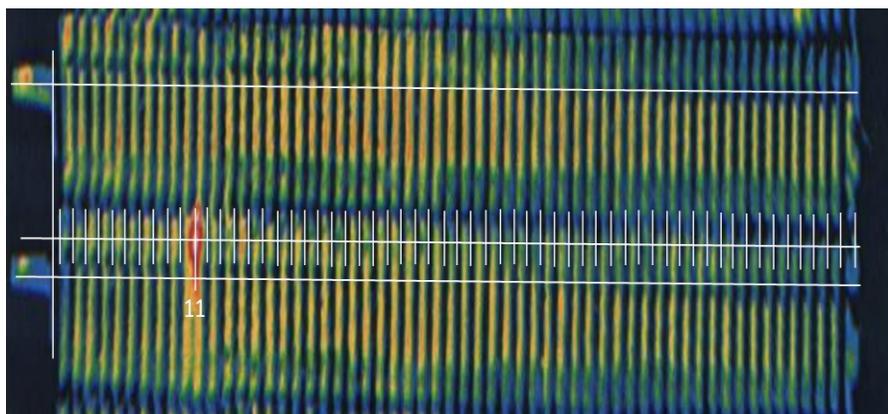


Рисунок 8 – Проверка ячейки с использованием алгоритма обнаружения и идентификации короткого замыкания

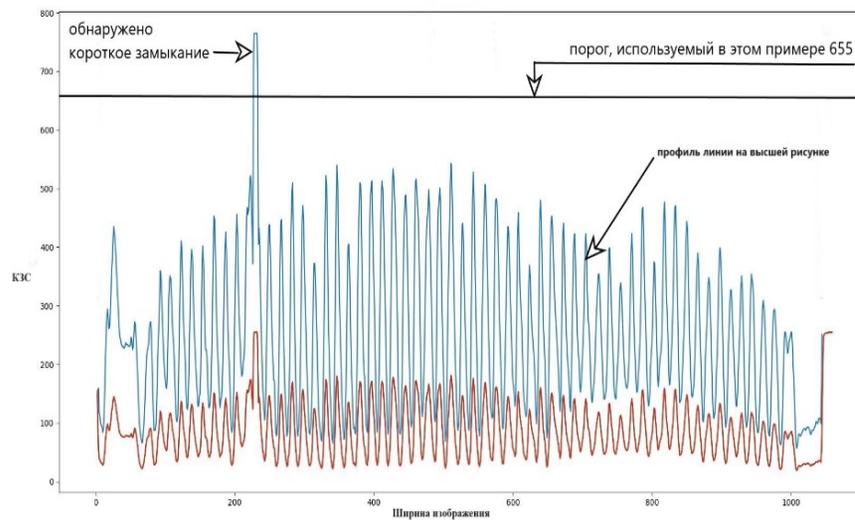
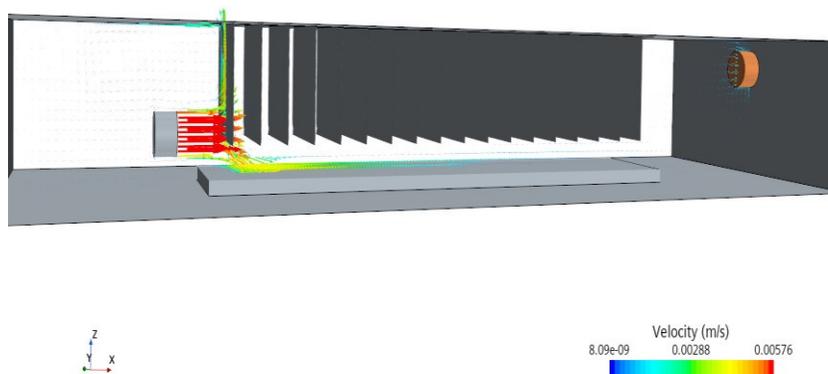


Рисунок 9 – Значения шкалы излучения и изменения цвета



Площадь	Позиция (м)	Скорость(м/с)
1	-2	0.025
2	-1.6	0.023
3	-1.2	0.022
4	-0.8	0.022
5	-0.4	0.02
6	0	0.019
7	0.4	0.018
8	0.8	0.018
9	1.2	0.017
10	1.6	0.017
11	2.2	0.016

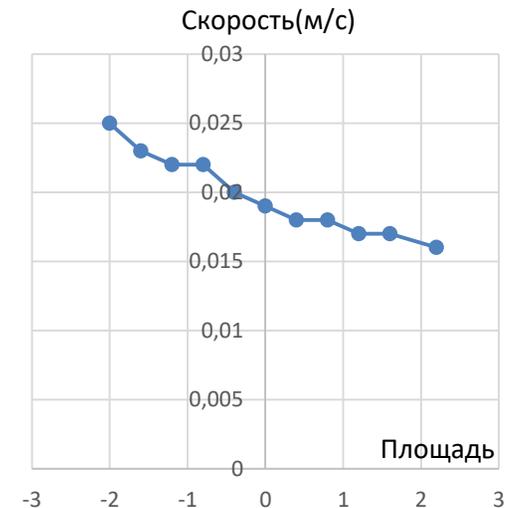
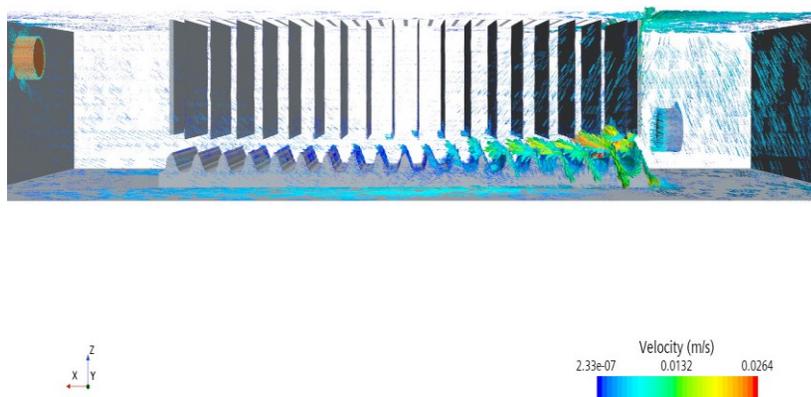


Рисунок 11 – Изменение скорости электролита в сечениях без осадка



Площадь	Позиция (м)	Скорость(м/с)
1	-2	0.040
2	-1.6	0.035
3	-1.2	0.034
4	-0.8	0.030
5	-0.4	0.028
6	0	0.025
7	0.4	0.025
8	0.8	0.025
9	1.2	0.023
10	1.6	0.024
11	2.2	0.020

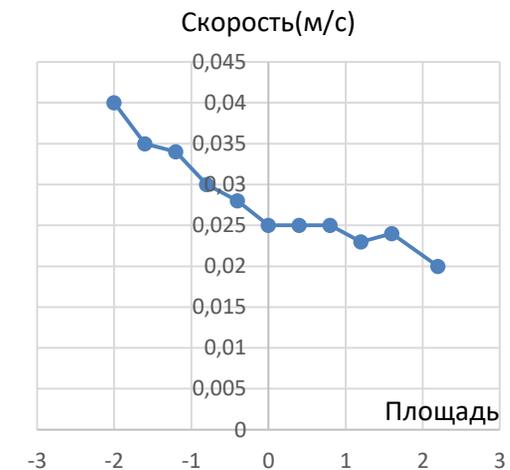


Рисунок 12 – Изменение скорости электролита в сечениях в присутствии осадка

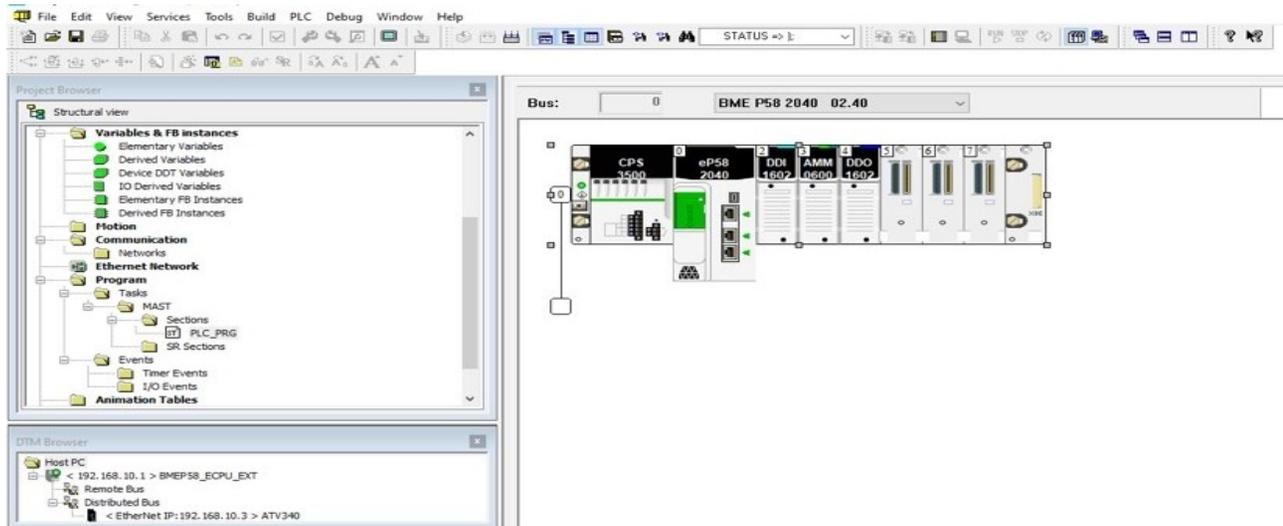


Рисунок 10 – Скриншот разработанной программы контроля шламового осадка и дендритных срастаний

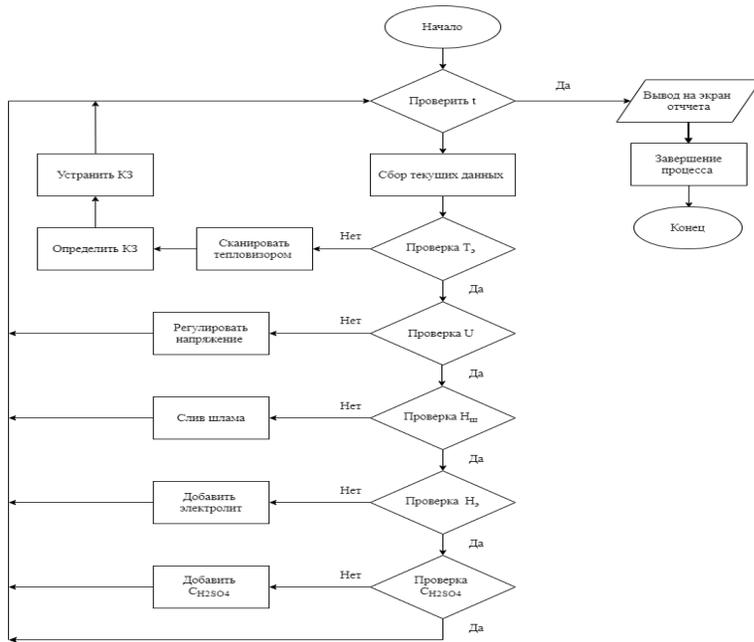


Рисунок 13 – Алгоритм работы программы

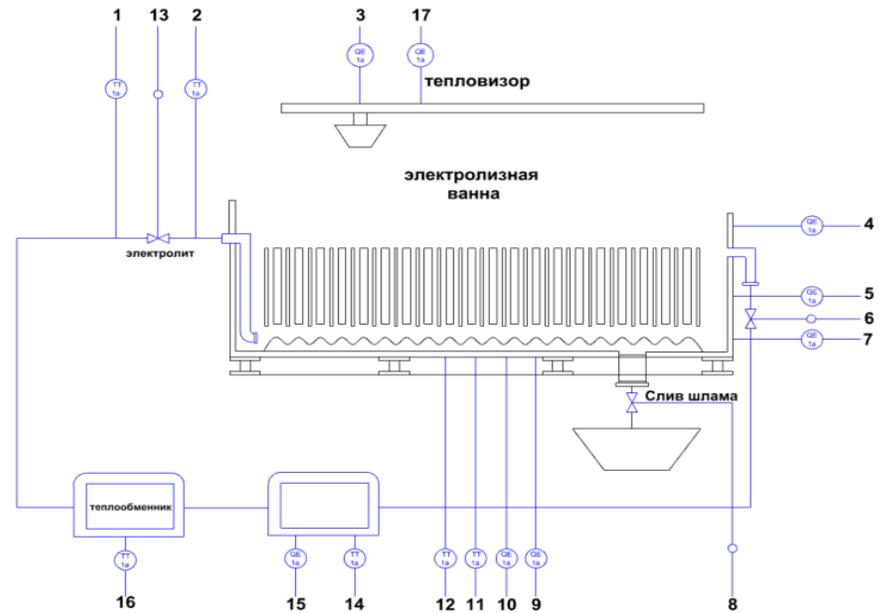


Рисунок 14 - Схема цифровой автоматизации электролитической ванны для рафинирования меди