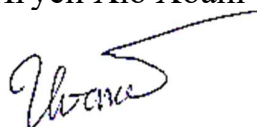


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Нгуен Хю Хоанг



ЦИФРОВАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ РАФИНИРОВАНИЕМ МЕДИ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бажин Владимир Юрьевич

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ РАФИНИРОВАНИЕМ МЕДИ.....	9
1.1 Медные руды и динамика мирового производства меди	9
1.2 Описание технологического процесса производства меди.....	14
1.3 Электролитическое рафинирование меди	18
1.4 Состояние АСУ ТП в производстве меди.....	29
1.5 Современные тенденции и практика производства меди	32
1.6 Цель и задачи исследований	34
Выводы к главе 1	34
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	35
2.1 Анализ и выбор метода исследования для обнаружения коротких замыканий.....	35
2.1.1 Неразрушающий контроль	35
2.1.2 Тепловизионный контроль как пример неразрушающего метода диагностики металлургических агрегатов	39
2.1.3 Характеристики тепловизионной камеры.....	41
2.1.4 Обработка изображений, полученных с тепловизионной камеры	44
2.2 Экспериментальные исследования в лабораторных условиях	47
2.2.1 Лабораторная установка для обнаружения и фиксирования коротких замыканий.....	47
2.2.2 Способы ограничения роста дендритов.....	51
2.3 Способы обнаружения коротких замыканий в процессе электролиза катодной меди.	53
2.3.1 Использование гауссметра	53
2.3.2 Использование прибора «Электрод-12»	54
2.3.3 Использование устройства «Opti bar Intercell Bars»	56
Выводы к главе 2	57
ГЛАВА 3 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ РАФИНИРОВАНИЕМ МЕДИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВО ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕНДРИТНОГО ОСАДКА ГЛАВА.....	58
3.1 Изучение влияния степени образования (высоты) дендритного осадка на процесс электролиза катодной меди.....	58

3.2 Алгоритм идентификации коротких замыканий.....	67
3.3 Создание программы для ЭВМ «Программа цифрового автоматизированного контроля процесса электролитического рафинирования меди»	71
Выводы к главе 3	74
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ.....	76
4.1 Создание виртуальной модели электролизера для определения влияния осадка на дне ванны на качество меди	76
4.2 Разработка алгоритма управления процессом электролитического рафинирования меди	86
4.3 Разработка программы цифрового автоматизированного контроля основных параметров процесса рафинирования катодной меди.....	89
4.4 Экономическая эффективность предлагаемого решения.....	91
Выводы к главе 4	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ ..	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ...	106
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертации.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении результатов диссертации.....	109

ВВЕДЕНИЕ

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), Cuzum (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.

Для повышения технико-экономических показателей процесса электролиза меди необходимо использование цифрового двойника при вводе дополнительных параметров в систему автоматизации и управления (АСУ) электролизера для мониторинга и поиска места образования дендритов, их объема и количества для быстрого устранения с использованием разнообразных способов их ликвидации. Кроме этого, крайне важно постоянно контролировать высоту осадка на дне электролизной ванны, чтобы избежать коротких замыканий и растворение шлама в электролите.

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.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности по пунктам - Автоматизация контроля и испытаний.(п.2); Методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т. д.(п.3); Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизация модульных структур систем сбора и обработки данных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.(п.8).

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%.

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 Приложение В) и Медеплавильного завода «Лаокай»(Институт горной науки и технологии Вьетнам) во Вьетнаме(№1 от 15/04/2024 Приложение Г).

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 «SAMSTech-II 2021: Современные достижения в области материаловедения и технологий», (Красноярск 29-31 июля 2021 г.); Международном симпозиуме «Нанозифика 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 (пункты списка литературы № 48, 57, 58, 96), 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 (Приложение А, Б) (пункты списка литературы № 42,43).

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ РАФИНИРОВАНИЕМ МЕДИ

1.1 Медные руды и динамика мирового производства меди

Во Вьетнаме медь занимает третье место по совокупности и потреблению среди металлов, после стали и алюминия. Благодаря хорошей электропроводности, теплопроводности, высокой прочности медь и медные сплавы широко используются в качестве электрических проводников в промышленном и гражданском электрооборудовании вьетнамских производителей[95].

На данный момент энергетические возможности недостаточны для создания крупномасштабных проектов в металлургической промышленности. Источником электроэнергии для организации процесса производства медеплавильного завода является Национальная энергосистема, работающая при высоком напряжении 500 кВ, 220 кВ и 110 кВ и среднем напряжении от 6 кВ до 35 кВ. Для решения проблемы краткосрочного дефицита в электроэнергии стоит задача повысить эффективность производства, автоматизировать управление технологическим процессом и особенно минимизировать потери электрической энергии на медеплавильных заводах.

Процесс производства электролитической катодной меди является энергоемким производством и несет в себе большие затраты из-за несовершенства контроля и управления основными параметрами, влияющими на удельный расход электроэнергии. В первую очередь это температура электролита, состав электролита, межполюсное расстояние, содержание и уровень шламовых осадков в электролитной ячейке. Часть параметров не контролируется, что приводит к снижению энергоэффективности производства. Основными причинами энергических потерь во время электролитического рафинирования меди являются дендритные замыкания (срастание электродов), что связано с расстоянием между катодом и анодом (межполюсным расстоянием). Также потери связаны с образованием шлама, в этом случае потери связаны с нарушением баланса по драгоценным металлам, всегда присутствующим в производстве меди.

Целью исследования является повышение уровня автоматического контроля и управления электролитическими ячейками за счет снижения количества ручных замеров. Необходимо создание цифровой системы контроля, которая должна обеспечивать через стохастическую систему работу нейронной сети с использованием Базы данных на всех уровнях САУ электролиза. Задача стоит в минимизации межэлектродного расстояния с учетом изменений концентрации и температуры электролита. Все параметры должны быть связаны между собой, для того чтобы обеспечить оперативное управление процессом в случае замыкания электродов или повышения уровня шлама.

Для оптимизации необходима установка дополнительных точек контроля, снабженных датчиками и микроконтроллерами для передачи данных в Базу данных системы автоматизации. Специальные сканирующие тепловизоры и камеры технически могут быть элементом создания цифрового двойника системы АСУ ТП «Электролиз меди».

Повышение уровня контроля и управления через цифровые автоматизированные системы в электролитическом рафинировании меди позволят сократить энергозатраты на 15-20%, что дает возможность организации производства в условиях дефицита электроэнергии.

Медь является самым ранним металлом который использовался людьми для создания бронзовых предметов, датируемых примерно 8700 годом до нашей эры. В настоящее время, несмотря на наличие многих других металлов, медь всегда сохраняет свое значение. Ожидается, что в будущем мировой спрос на медь будет продолжать расти из-за незаменимой роли меди в современных технологиях. Сырьем для производства меди являются концентраты, получаемые из медных руд, а также вторичные материалы (лом цветных металлов)[79,14].

Медные руды

Медные руды представляют собой природные минералы, содержащие медь в достаточном количестве для её экономически выгодной добычи и переработки. Медные руды встречаются в различных формациях и включают множество различных типов минералов, содержащих медь. Наиболее распространенные типы медных руд в природе включают сульфидные, оксидные и смешанные формы[30,25,9].

В первичных рудах большинства промышленных месторождений медь встречается в сульфидной форме. Сульфидные руды включают несколько основных видов минералов, которые являются важными источниками меди и других металлов(халькопирит (CuFeS_2), борнит (Cu_5FeS_4), халькозин (Cu_2S), ковеллин (CuS))[17,50]. Халькопирит (CuFeS_2) является наиболее распространенной медной рудой, содержащей около 34% меди, и служит основным источником этого металла в мировом масштабе, сопровождаясь примесями железа и серы, что требует их удаления в процессе переработки. Борнит (Cu_5FeS_4), характеризующийся медным цветом с пурпурным оттенком, содержит до 63% меди и играет значительную роль в некоторых регионах. Халькозин (Cu_2S), с содержанием меди до 79,8%, представляет собой один из наиболее экономически выгодных минералов благодаря высокому содержанию меди и простоте переработки. Ковеллин (CuS), содержащий около 66,5% меди, часто встречается в богатых медью месторождениях и является важным источником металла, особенно в комплексных рудных формациях, где применяется смешанная переработка.

Окисленные руды меди включают такие важные минералы, как куприт (Cu_2O), содержащий до 88,8% меди, малахит ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) с содержанием меди около 57,5%, и азурит ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$), содержащий около 55,3% меди. Эти минералы образуются в зонах окисления медных месторождений и часто имеют яркие цвета, что делает их легко идентифицируемыми. Окисленные руды обрабатываются преимущественно гидрометаллургическими методами, такими как выщелачивание с использованием серной кислоты, что позволяет эффективно извлекать медь из руды. Эти руды играют важную роль в месторождениях с бедными медными запасами или в зонах, где традиционные методы добычи менее эффективны.

Кроме этого, существуют смешанные руды, которые содержат как сульфидные, так и окисленные минералы меди. Эти руды требуют комплексных методов переработки для эффективного извлечения меди, сочетая пирометаллургические и гидрометаллургические процессы.

В медных рудах часто встречаются минералы, содержащие Fe, Mo, W, Pb, Co и As. В значительных количествах также присутствуют Au, Ag и V [10,28]. Месторождения меди разделяют на 9 геолого-промышленных типов: порфировые месторождения, связанные с гранитами и содержащие медные и молибденовые руды (Чили, Перу); скарновые месторождения в контактово-метасоматических зонах с высококачественными рудами меди и железа (Китай, Казахстан); вулканогенно-осадочные месторождения в подводных условиях с богатым содержанием меди, свинца и цинка (Норвегия, Канада); седиментно-осадочные месторождения в осадочных бассейнах с медными сланцами и песчаниками (Польша, Замбия); месторождения типа "Красная медь" в континентальных красноцветных осадочных породах (США, Россия); месторождения медных песчаников в осадочных бассейнах (Конго, Германия); эпитермальные месторождения в зонах гидротермальной активности с медными, серебряными и золотыми рудами (Мексика, Филиппины); карбонатитовые месторождения, связанные с карбонатитовыми породами и содержащие медь и редкоземельные элементы (Бразилия, Индия); и плагиоклазовые месторождения с ультраосновными магматическими породами, содержащими медные и никелевые руды (Канада, Россия)[42,30]. В перспективе как самостоятельный геолого-промышленный тип могут оформиться месторождения медьсодержащих морских железо-марганцевых конкреций и мулов, а также ураново-золото-медные месторождения. Среднее содержание меди в различных типах руд колеблется в пределах 0,3-5%. Медь присутствует в комплексных рудах, содержащих Ni, Co, Pb, Sn, W, Bi и Au. Главные добывающие страны в конце XX — начале XXI века включают Чили, США, Канаду, Замбию, Конго (Браззавиль), Конго (Киншаса), Перу и Россию (Рисунок 1.1, 1.2)

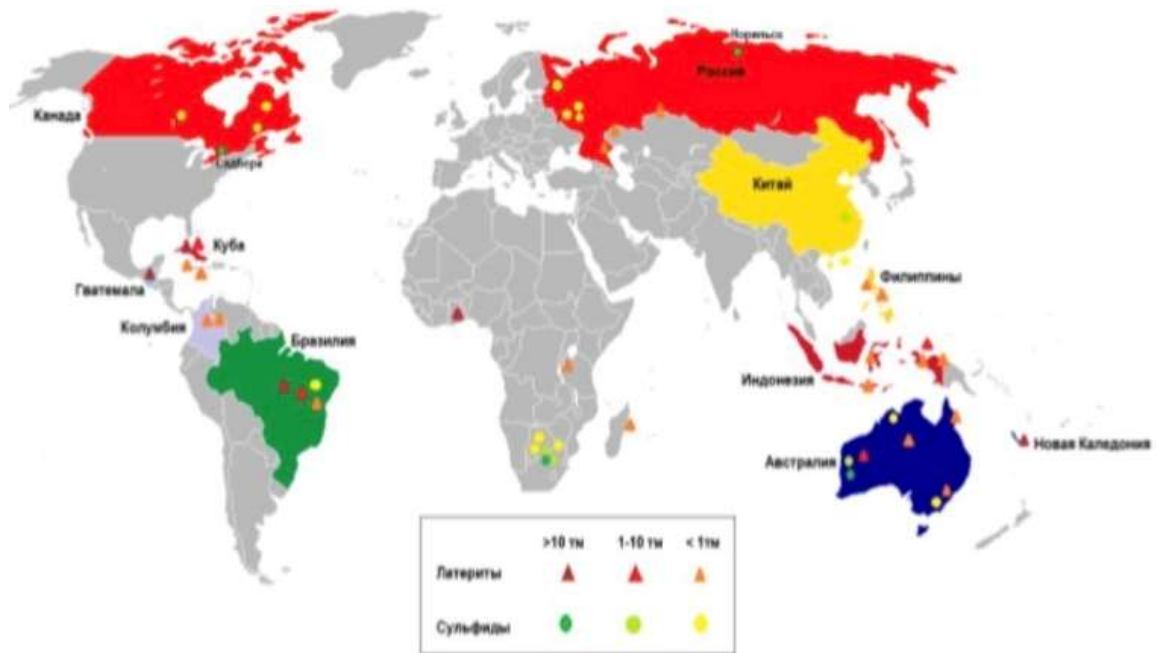


Рисунок 1.1 – Мировые ресурсы сульфидных и оксидных медных руд (латеритов)[27]

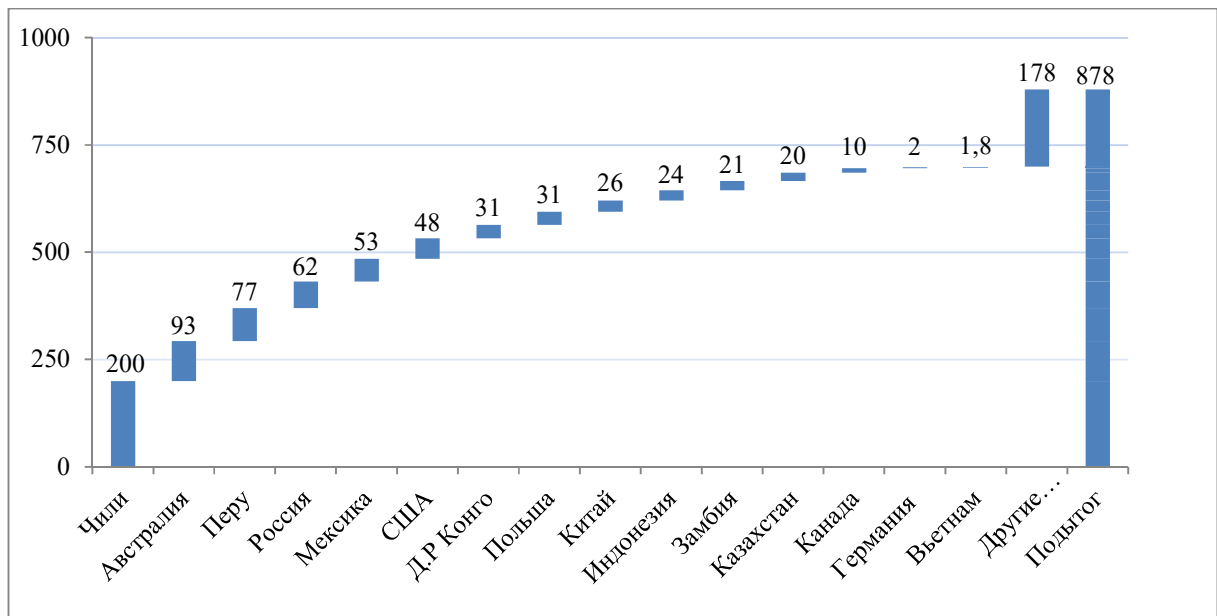


Рисунок 1.2 – Мировые запасы меди по странам, млн. тонн[27]

Крупнейшим потребителем меди в мире является Китай. В основном китайские компании приобретают медный концентрат и самостоятельно производят из него рафинированную медь, однако также импортируют и готовую продукцию (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Потребление рафинированной меди по регионам[27]

Производство меди в мире имеет положительную динамику. Среднемировой темп роста за последние 10 лет составил 3,4% (рисунок 1.4).

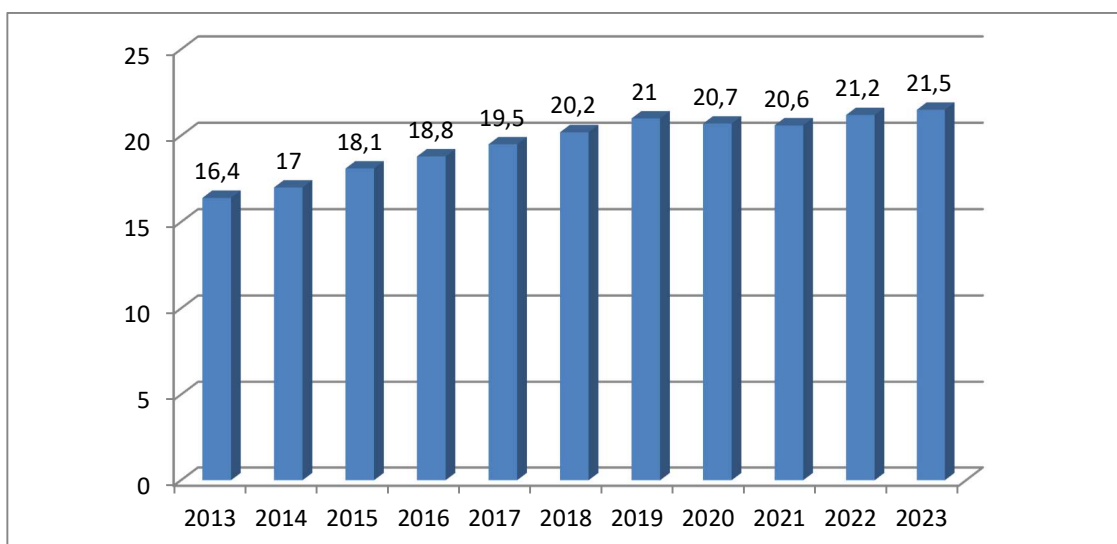


Рисунок 1.4 – Динамика производства меди в мире в 2012-2022 годах, млн. тонн[27]

Общее производство меди в мире имеет тенденцию к постепенному росту с 2010 года, за исключением 2019 года, когда производство снизилось на 0,6%. В 2020 году мировое производство меди снизилось на 1,5% по сравнению с 2019 годом, в основном из-за пандемии COVID-19, которая повлияла на экономику и привела к закрытию некоторых медеплавильных предприятий.

Общий объем производства меди в мире в 2022 году составил около 21,5 млн тонн. Как видно из рисунка 1.5, большую долю производства меди в мире занимает несколько крупнейших стран, таких как Чили, Китай и Перу. Однако, значительный объем производства меди также происходит в других странах мира.



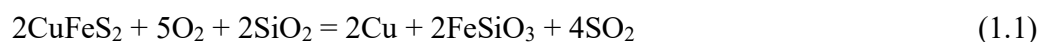
Рисунок 1.5 – Производство меди по странам в 2022 году, %[27]

1.2 Описание технологического процесса производства меди

Медь - важное промышленное сырье. По объему потребления медь занимает третье место среди металлов, сразу после стали и алюминия. Благодаря хорошей электрической и теплопроводности, а также высокой прочности медь и медные сплавы широко используются в качестве электрических проводников в промышленном и гражданском электрооборудовании. Кроме того, медь и медные сплавы также широко используются в машиностроении, строительстве, производстве электродов и т.д. Также широко используются соединения меди, такие как оксид меди, сульфат меди, оксихлорид меди. Широко используются в таких областях, как сельское хозяйство, судостроение, консервация древесины.

Для получения меди используются различные металлургические процессы, такие как пирометаллургия, гидрометаллургия и электрометаллургия.

1. Производство меди пирометаллургическим способом производят в печах автогенной плавкой сульфидных руд CuFeS_2 , и процесс идет по следующей формуле (1.1):



Как правило, более 70-75% меди выпуска получают после прохождения последовательных стадий обжига, автогенной плавки, конвертирования, и огневого рафинирования. При этом, сера концентрируется в штейне, а примеси переходят в шлак в оксидной форме

2. Гидрометаллургические способы (аммиачное выщелачивание, осаждение и метод Карона), заключаются в избирательном растворении и, последующем выделении из растворов аммиака и серной кислоты, за счет вытеснения из полученных растворов меди металлическим железом (1.2):



3. Электролитическое рафинирование меди из водных электролитов серной кислоты является наиболее эффективным процессом для получения чистой меди 99, 999% Получение чистой меди методом электролиза (1.3).



На катоде осаждается чистая медь, а на поверхности металлического или растворимого анода выделяется кислород.

Для рафинирования меди и удаления примесей отливают аноды виде пластин, кот орые помещают в электролитическую ячейку. В качестве катодов используют тонкие листы стали или титана, на которые осаждается чистая медь. Ионы меди под действие электрического тока после диссоциации двигаются в направлении катодной поверхности [53,4].

Такие примеси как олово, железо, цинк, кадмий в течении всего процесса растворяются на аноде, потому что, они имеют более отрицательный потенциал в электрохимическом ряду напряжений.

Производство меди из руды включает несколько стадий, каждая из которых необходима для извлечения металла в чистом виде. Основными методами производства меди из руд является пирометаллургическим и гидрометаллургическим. Эти методы основаны на различных подходах к обработке руд и извлечению меди. Каждый из этих методов может использоваться в зависимости от типа руды и конечных требований к качеству меди. Гидрометаллургический метод наиболее эффективен для переработки окисленных руд и бедных руд, которые не подходят для пирометаллургической обработки. Однако большинство медных руд в мире представляют собой сульфидные руды, для которых гидрометаллургический метод менее эффективен.

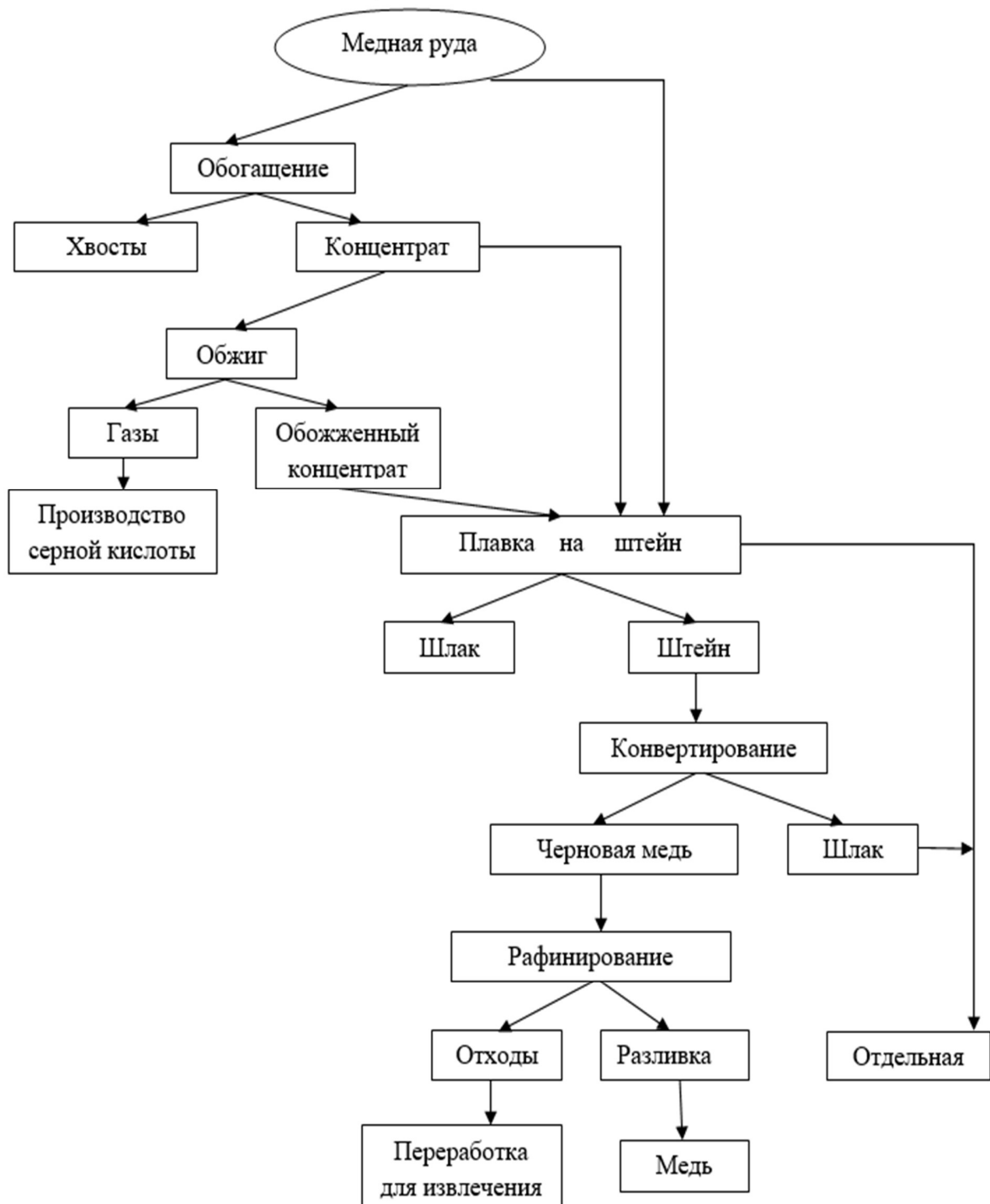


Рисунок 1.6 – Схема переработки медных руд и концентратов.

Пирометаллургический способ получил широкого распространения, получают 90% первичной меди и позволяет осуществлять разработку любого сырья с извлечением всех компонентов. Пирометаллургический способ производства меди включает несколько стадий, каждая из которых направлена на извлечение меди из руды путем термической обработки (рисунок 1.6).

Первоначально медная руда добывается либо открытым способом, либо методом подземной добычи. Затем руду измельчают и проводят процесс флотации, который позволяет отделить медные сульфиды от пустой породы. В результате получается концентрат меди с высоким содержанием меди (обычно около 20-30%).

Концентрат меди обжигают в печах для удаления части серы, превращая медные сульфиды в оксиды меди (CuO). Этот процесс также способствует удалению некоторых примесей, таких как железо и сера. Обжиг проводят в специальных печах при высоких температурах (около 600-700 °C), что приводит к образованию газов, содержащих диоксид серы (SO_2), который может быть использован для производства серной кислоты.

Обоженный концентрат меди затем отправляется в плавильные печи, такие как шахтные печи или печи типа Ванюкова. В процессе плавки концентрат подвергается воздействию высоких температур (до 1200-1300 °C), что приводит к образованию медного штейна, состоящего из сульфидов меди и железа. Шлак, который содержит примеси, отделяется от штейна и утилизируется или перерабатывается.

Медный штейн далее обрабатывают в конвертере. В этот процесс вводят кислород или воздух для окисления сульфидов меди и железа. Окисление вызывает удаление серы в виде диоксида серы (SO_2), оставляя медь и железо в расплавленном виде. Железо образует шлак, который удаляется, а медь остается в виде "черновой" меди с чистотой около 98-99%.

Черновую медь переплавляют в рафинировочных печах для дальнейшего очищения. В этом процессе добавляют различные флюсы для удаления оставшихся примесей. На этом этапе медь достигает чистоты примерно 99.5-99.9%. Очищенная медь отливается в формы, образуя аноды, которые затем будут использоваться для электролитического рафинирования.

Для достижения наивысшей чистоты медь подвергают электролитическому рафинированию. Аноды из черновой меди погружают в электролитический раствор, состоящий из серной кислоты и медного купороса (CuSO_4). В процессе электролиза медные ионы осаждаются на катодах в виде чистой меди (99.99%), а анодный шлам, содержащий драгоценные металлы и другие примеси, оседает на дне электролитической ванны. Этот метод позволяет получить медь высочайшего качества, пригодную для использования в электротехнической промышленности и других высокотехнологичных областях.

Электролитическое рафинирование является важным заключительным этапом в производстве меди, обеспечивающим получение металла с необходимыми характеристиками чистоты. Этот процесс, несмотря на его сложность и потребность в значительных затратах на

электроэнергию и оборудование, оправдывает себя за счет высокого качества получаемого продукта и возможности извлечения ценных сопутствующих элементов.

1.3 Электролитическое рафинирование меди

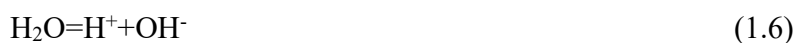
Медь, полученная в результате огневого рафинирования содержит еще значительное количество примесей (0,2-1,1%) и поэтому подвергается электролитическому рафинированию, цель которого - получение меди достаточно высокой степени чистоты и извлечение из нее благородных металлов и других ценных примесей (селен, теллур и т.д.) [16,18,80].

Из меди, полученной при огневом рафинировании, отливают аноды, представляющие собой медные плиты с ушками-электрододержателями, которыми аноды опираются на бортовые шины или борта ванны при завешивании их в ванну, ширина анодов составляет 700-900 мм, длина 1000 мм, толщина 30-50 мм. Масса анодов на разных заводах колеблется от 160 до 320 кг.

Электролитная ванна представляет собой кожух прямоугольной формы длиной 3-5 м, сделанный из дерева или железобетона и футерованный изнутри кислотостойким материалом (листовой свинец, винипласт и др.). В ванну завешивают аноды, а между ними катодные основы - тонкие листы из чистой меди толщиной 0,4-0,8 мм, полученные в специальных матричных ваннах, где катодами служат листы из чистой полированной меди, нержавеющей стали или титана. Катодные основы должны быть длиннее и шире анодов на 20-40 мм.

Аноды и катоды погружают в слой электролита (раствор сульфата меди и серной кислоты в воде) и подключают к источнику постоянного тока: аноды к положительному полюсу, а катоды к отрицательному. При прохождении электрического тока анод растворяется, а на катоде выделяется чистая медь.

В результате электролитической диссоциации компонентов электролита в растворе образуются ионы (1.4) – (1.7):



где $\text{Me}_{\text{пр}}$ - примеси.

Не учитывая пока поведение катионов примесей, рассмотрим возможные катодные и анодные процессы с участием ионов меди, водорода, молекул воды и SO_4^{2-} .

Катодные процессы. Теоретически на катоде возможен разряд ионов меди и водорода по реакциям (1.8) – (1.9):



где φ^0 – нормальный потенциал электрода, В.

Потенциал электрода в условиях обратимых электродных процессов зависит от активности ионов в растворе и может быть вычислен по формуле Нернста (1.10):

$$\varphi = \varphi^0 + \frac{RT}{nF} \ln a, \quad (1.10)$$

где R – универсальная газовая постоянная, R = 8,31 В.К/град.моль; T – температура, К; n – количество электронов; F – фарадеевская константа, F = 96500 К; a – активность катиона.

Согласно общим положениям физической химии в первую очередь должны протекать процессы, сопровождающиеся большей убылью изобарно-изотермического потенциала, т.е. процессы, связанные с меньшей затратой энергии.

Применительно к рассматриваемому случаю на катоде в первую очередь должен протекать разряд более электроположительных ионов – ионов двухвалентной меди, нормальный потенциал разряда которых +0,34В, а не ионов водорода ($\varphi^0 = 0,0$).

Однако, как видно из формулы (1.10), потенциал электрода зависит не только от нормального потенциала, но и от активности ионов в растворе. Совместный разряд ионов будет иметь место при равенстве потенциалов ионов меди и водорода (1.11) – (1.12):

$$\varphi_{\text{Cu}^{2+}} = \varphi^0_{\text{Cu}^{2+}} + \frac{RT}{nF} \ln a_{\text{Cu}^{2+}} = +0,34 + \frac{RT}{nF} \ln a_{\text{Cu}^{2+}} \quad (1.11)$$

$$\varphi_{\text{H}^+} = \varphi^0_{\text{H}^+} + \frac{RT}{nF} \ln a_{\text{H}^+} = +0,00 + \frac{RT}{nF} \ln a_{\text{H}^+} \quad (1.12)$$

Положим, что $a_{\text{H}^+} = 1 = C_{\text{H}^+}$ (C = концентрация), а $a_{\text{Cu}^{2+}} = C_{\text{Cu}^{2+}}$, тогда для температуры 25°C совместным решением уравнений (1.11) и (1.12), при условии $\varphi_{\text{Cu}^{2+}} = \varphi_{\text{H}^+}$ получим (1.13)

$$\ln C_{\text{Cu}^{2+}} = -\frac{0,34 \cdot 2 \cdot 96500}{8,31 \cdot 298} = -26,4, \quad (1.13)$$

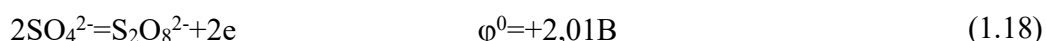
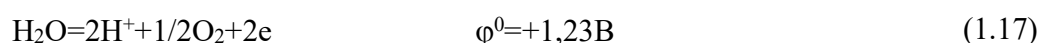
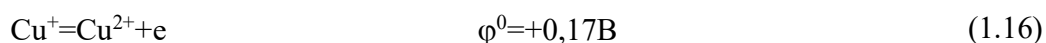
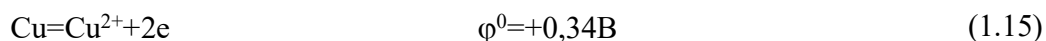
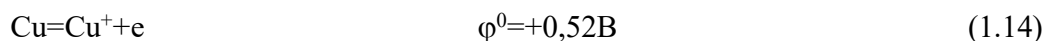
$$\text{откуда } C_{\text{Cu}^{2+}} = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ г-ион/дм}^3 \text{ или } 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ г/дм}^3$$

Приведенный расчет показывает, что совместный разряд ионов меди и водорода на катоде возможен лишь при очень малых концентрациях ионов меди в растворе, что на практике в условиях электролиза меди не допускают и, следовательно, реакция (1.9) практически невозможна.

Анодные процессы. В зависимости от характера анода (растворимый или нерастворимый), валентности катионов, наличия различных анионов в растворе и других факторов на аноде при

электролизе могут протекать различные процессы: ионизация металла анода и переход его в раствор в виде ионов, окисление ионов низшей валентности до высшей, разряд анионов и т.д.

Среди электродных процессов на аноде, вероятных при электролизе меди с растворимым и нерастворимым анодом, можно отметить следующие (1.14) – (1.18):



Сравнивая потенциалы реакций (1.14) - (1.16) с потенциалом реакции (1.17) - разряд ионов гидроксила для случая кислой среды, можно сказать, что при электролизе с растворимыми (медными) анодами электродные процессы на них будут связаны лишь с превращениями ионов меди [реакция (1.14)-(1.16)], а выделение кислорода на аноде [реакция (1.17)] и тем более реакция (1.18) иметь место не могут.

При электролизе меди с нерастворимыми (свинцовыми) анодами в регенеративных ваннах, а также при выделении меди из растворов, полученных при гидрометаллургических способах переработки медьсодержащих материалов, на аноде будет протекать реакция (1.17), а реакция (1.18) и в этом случае, будет лимитирована, и проходить не будет.

Наиболее электроотрицательным потенциалом из них обладает реакция (1.16), и она должна протекать в первую очередь, но в начальный момент электролиза в растворе отсутствуют ионы одновалентной меди, значит, при растворении анода протекает в действительности реакция (1.15), сопровождающаяся переходом в раствор меди в виде двухвалентных ионов.

В растворе сульфата существует равновесие: двухвалентной меди в присутствии металлической меди (1.19):



Равновесные концентрации Cu^+ невелики, но растут с увеличением температуры. Константа равновесия реакции (1.19) $K_p=[\text{Cu}^{2+}]/[\text{Cu}^+]^2$ для раствора содержащего 40 г/л меди и 190 г/л серной кислоты принимает в зависимости от температуры следующие значения (см. таблицу 1.1) [4]:

Таблица 1.1 – Константа равновесия реакции $K_p = [\text{Cu}^{2+}]/[\text{Cu}^+]^2$ от температуры.

T, °C	25	40	50	60
K _p	$1,7 \cdot 10^{10}$	$3,65 \cdot 10^3$	$1,01 \cdot 10^5$	$4,32 \cdot 10^4$

Вследствие ничтожно малых равновесных концентраций ионов одновалентной меди в растворе равновесный потенциал реакции (1.14) смещается в электроотрицательную сторону и становится соизмеримым с потенциалом реакции (1.15), поэтому наряду с основной реакцией (1.15) на аноде некоторое развитие получает и реакция (1.14). Что касается реакции (1.16), то так как концентрация ионов одновалентной меди в растворе мала, потенциал ее, наоборот, смещается в электроположительную сторону. Поэтому в результате устанавливается динамическое равновесие, характеризующееся константой равновесия реакции (1.19) которой должен соответствовать компромиссный потенциал φ_k на медном электроде. При 25°C в 1N растворе CuSO_4 компромиссный потенциал $\varphi_k = +0,316\text{В}$, а при 55°C $\varphi_k = +0,335\text{В}$, т.е. близок к нормальному потенциалу реакции (1.15).

Ионы Cu^+ неустойчивы в растворах сульфата меди. В нейтральной среде у катода может иметь место гидролиз Cu_2SO_4 с образованием на катоде темно-красных кристалликов закиси меди (1.20).



В кислых растворах ионы одновалентной меди окисляются кислородом воздуха, растворенным в электролите (1.21):



Из-за протекания реакций (1.20) и (1.21) равновесие реакции (1.19) нарушается, поэтому на аноде образуются новые ионы одновалентной меди. В результате реакции (1.21) концентрация серной кислоты в электролите снижается, а содержание ионов двухвалентной меди повышается. Такими же последствиями сопровождается непосредственное растворение меди серной кислотой в присутствии кислорода воздуха по реакции (1.22):



которая также имеет место при электролизе меди. В итоге в растворе накапливается 1-2% меди от ее количества в анодах.

Концентрационная поляризация. При электролизе меди на катоде происходит практически только разряд ионов меди, а на аноде образуются ионы Cu^+ (ионизацией некоторых примесей, содержащихся в аноде, пренебрегаем), тогда как в переносе электричества участвуют ионы не только меди, но и H^+ , SO_4^{2-} и др.

Количество ионов, подводимых к катоду и отводимых от анода, пропорционально числам переноса отдельных ионов, поэтому количество ионов меди, подводимых к катоду за счет электрического тока, меньше количества ионов меди, разряжающихся на катоде. Напротив, количество ионов меди, образующихся на аноде, меньше количества ионов меди, отводимых от анода под действием электрического тока. Если бы не действовали другие факторы, то через некоторое время концентрация ионов меди у катода снизилась бы до нуля, а у анода стала бы настолько высокой, что образовался бы насыщенный раствор сульфата меди и на поверхности электрода началась бы кристаллизация этой соли. Прохождение тока через ванну прекратилось бы.

Этих явлений в обычных условиях не происходит, так как при появлении разницы концентраций ионов меди в приэлектродных слоях и в толще электролита начинается диффузия от больших концентраций вещества к меньшим. После установления стационарного состояния концентрация ионов меди в прикатодном слое все же будет несколько меньше, а в прианодном больше, чем в массе электролита. Это явление вызывает концентрационную поляризацию. Величина ЭДС концентрационного элемента, направленной в сторону, обратную подводимому постоянному току, определяется уравнением, выведенным на основании формулы (1.23),

$$\varphi_{\text{конц}} = 0,0001 * T \lg a_1/a_2 \quad (1.23)$$

где a_1 , и a_2 - активности ионов меди в прианодном и прикатодном слое электролита соответственно.

На практике величина концентрационной поляризации при электролитическом рафинировании меди сравнительно невелика и обычно не превышает нескольких сотых долей вольта.

Поведение примесей

Примеси, присутствующие в анодной меди, по их природе и величине стандартного потенциала можно разделить на четыре группы[67,68]:

- 1) примеси значительно более электроотрицательные чем медь (цинк, железо, кобальт, никель, олово, свинец);
- 2) примеси, имеющие стандартный потенциал близкий к стандартному потенциалу меди (мышьяк, сурьма, висмут);
- 3) примеси более электроположительные чем медь (золото, серебро и платиноиды);
- 4) примеси (селен, теллур, сера, кислород), образующие с медью соединения (Cu_2Se , Cu_2Te , Cu_2S , Cu_2O) пассивные в электрохимическом отношении в условиях электролитического рафинирования меди.

Приведем значения стандартных потенциалов при 25°C некоторых электродов, обратимых в отношении катиона (см. таблицу 1.2):

Таблица 1.2 – Значения стандартных потенциалов при 25°C различных электродов.

Электрод	Zn/Zn ²⁺	Fe/Fe ²⁺	Co/Co ²⁺	Ni/Ni ²⁺	Sn/Sn ²⁺
φ ⁰ , В	-0,782	-0,44	-0,277	-0,28	-0.136
Электрод	Pb/Pb ²⁺	Fe/Fe ³⁺	H ₂ /2H ⁺	Pb/Pb ³⁺	Bi/Bi ³⁺
φ ⁰ , В	-0,12	-0,038	+0,0	+0,212	+0,226
Электрод	As/As ³⁺	Cu/Cu ²⁺	Cu/Cu ⁺	Ag/Ag ⁺	Pd/Pd ²⁺
φ ⁰ , В	-0,247	+0,337	+0,52	+0,799	+0,937
Электрод	Pt/Pt ²⁺	Au/Au ³⁺	Au/Au ⁺		
φ ⁰ , В	+1,20	+1,50	+1,58		

1 - ая группа примесей – при растворении анода переходят в раствор и накапливаются в нем, не осаждаясь на катоде (цинк, железо, кобальт, никель), либо образуют малорастворимые соединения (сульфат свинца, метаоловянная кислота, основные соли олова), которые выпадают в шлам. Цинк присутствует в анодах в небольшом количестве (не более 0,015%) и заметного влияния на показатели электролиза меди не оказывает. Железо так же хорошо удаляется в процессе огневого рафинирования, но содержание его в анодах несколько выше (до 0,07%). Содержание железа в электролите может достигать 4-7 г/л[4]. При большом содержании железа в растворе наблюдается снижение выхода по току за счет электролитического окисления на аноде двухвалентного железа до трехвалентного $Fe^{2+}=Fe^{3+}+e$ ($\varphi^0=+0,77$ В) и химического растворения катодной меди (1.24):



Содержание никеля в анодах иногда достигает 0,8%. Исследования и практика работы предприятий показывают, что содержание никеля в катодной меди не превышает тысячных долей процента при содержании его в электролите 20-30 г/л (а иногда даже и выше). При очень большом содержании никеля в электролите ионы никеля, участвуя в переносе электрического тока, но не разряжаясь на катоде, скапливаются в прикатодном слое, что затрудняет диффузию ионов меди к катоду. Чтобы на аноде не образовывалась пленка закиси никеля, что может привести к "пассивированию" анода, следует при содержании никеля в анодах 0,4-0,8% снижать содержание в них кислорода ниже 0,04%. Это обеспечивает переход в раствор 95-99,7% никеля без образования пленки шлама на поверхности анода.

Олово переходит в раствор в виде сульфата двухвалентного металла, но затем Sn²⁺ окисляется до Sn⁴⁺, а сульфат окиси олова Sn(SO₄)₂ легко подвергается гидролизу и дает малорастворимые

основные соли или метаоловянную кислоту H_2SnO_3 , представляющую собой в условиях электролиза коллоид. Коллоидный раствор оказывает благоприятное влияние на качество осадка. Ионы двухвалентного олова восстанавливают также мышьяк из пятивалентного до трехвалентного состояния, в результате чего мышьяк выводится из раствора в шлам в виде малорастворимых солей мышьяковистой кислоты.

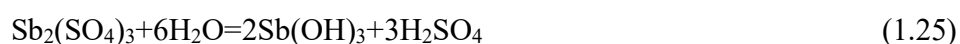
Общее отрицательное влияние примесей этой группы выражается в том, что, накапливаясь в растворе, они увеличивают сопротивление электролита и снижают растворимость сульфата меди. В катодный осадок они попадают только за счет межкристаллических включений электролита или основных солей.

2- рая группа примесей. Такие элементы, как мышьяк, сурьма, кадмий и висмут являются наиболее вредными примесями из-за близости стандартных потенциалов к потенциалу меди, а также они резко снижают электропроводность, и далее механические характеристики изделий из катодной меди. При растворении анода все три металла переходят в раствор, в значительной степени накапливаясь в нем. Затем частично они переходят в шлам, но до 10% каждого из них может попасть и в катодную медь как в результате электрохимического разряда ионов этих металлов на катоде, так и в виде механически попавших на катод частиц "плавучего" шлама и включений электролита[7].

Мышьяк переходит в раствор в трехвалентной форме в виде иона AsO_3^{3-} , но под влиянием растворенного в электролите кислорода быстро окисляется до пятивалентной формы и в электролите присутствует главным образом в виде иона AsO_4^{3-} . При отсутствии в растворе сурьмы и висмута мышьяк может накапливаться в электролите. В этом случае, по данным С. Сковронского, электрохимическое выделение мышьяка на катоде не происходит даже при содержании его в растворе 10 г/л.

Если в растворе имеются сурьма и висмут, то пятивалентный мышьяк может образовать с ними нерастворимые соединения типа $PbAsO_4$, которые выделяются из электролита в виде очень мелких (порядка 2-5 мкм) частиц. Эти частицы всплывают на поверхность электролита, образуя так называемый "плавучий" шлам. Плавучий шлам может легко захватываться катодом и загрязнять медь. Наиболее радикальным средством борьбы с плавучим шлаком является фильтрация электролита.

Сурьма также переходит в раствор в виде иона Sb^{3+} , содержание которого в электролите не превышает 1,1 г/л, поскольку даже в кислых растворах соли сурьмы подвержены гидролизу (1.25):



При гидролизе этой соли частично захватывается и мышьяк. Часть Sb^{3+} окисляется до пятивалентного состояния. Вследствие гидролиза солей Sb^{5+} концентрация их в электролите

ничтожна. Образующиеся при этом очень мелкие частицы $Sb_2O_5 \cdot 3H_2O$ присоединяются к частицам "плавучего" шлама. Начало разряда Sb^{3+} (концентрация в растворе 0,0002-9,02 г/л) совместно с ионами меди на катоде отмечается при потенциалах, равных 0,23-0,24 В.

Сдвиг потенциала в положительную сторону ($\varphi^0 = +0,212В$) обусловлен образованием твердого раствора химического соединения Cu_5Sb_2 с медью. Скорость разряда ионов сурьмы на катоде заметно снижается при наличии в электролите ионов хлора, что можно объяснить образованием комплексных анионов типа $(SbCl_6)^{3-}$, снижающих активность ионов сурьмы.

Висмут обычно содержится в анодах в небольшом количестве (до 0,008%). Его соли лучше растворимы в электролите, чем соли сурьмы (содержание висмута в электролите может достигать до 1,8 г/л), но как и соли сурьмы они легко гидролизуются. В "плавучий" шлам он переходит также в виде соединений с мышьяком.

3- группа примесей. Есть группа металлов, которые во время получения катодной меди металлы переходят в шлам. Это группа более электроположительные, чем медь элементов, такие как золото, серебро и группа платиноидов, которые проходят дополнительную стадию фильтрации и электроосаждения для извлечения из шламовых осадков, после периодической перекачки осадка (до накопления критического уровня) в шламоприемник. Они образуют с медью твердые растворы малых концентраций. При растворении анодной меди примеси с высоким электрохимическим потенциалом не образуют ионов, и остаются на аноде в виде атомно-дисперсного осадка [23].

Серебро при больших содержаниях его в аноде частично может перейти в электролит в виде Ag_2SO_4 . Чтобы уменьшить потери серебра, в электролит вводят ионы хлора (в виде поваренной соли), образующие с ионами серебра малорастворимое соединение $AgCl$.

Часть серебра находится в растворе и в виде коллоидальной взвеси. Общее количество серебра в катодной меди составляет около 1% от содержащегося в аноде. При этом примерно 25% серебра попадает в катодную медь в результате разряда ионов, а 75% — в результате катафоретического переноса. Переход серебра в катодную медь увеличивается с повышением температуры электролита.

Золото практически на 100% переходит в шлам. Причиной наблюдающегося в заводской практике загрязнения катодной меди золотом является механическое попадание шлама, содержащего золото, на катод.

Из последней (четвертой) группы примесей, образующих с медью соединения (Cu_2S , Cu_2Se , Cu_2Te , Cu_2O), только закись меди частично переходит в раствор по реакции (1.26) [73]



Подавляющее количество примесей этой группы переходит в шлам.

Как правило, электролизная серия ванн электролитического рафинирования меди включает два ряда электролитических ванн, последовательно включенных в цепь ячеек по, ключенных к преобразовательной подстанции через шинопровод. Электроды (катоды и аноды) чередуются и погружены в электролит на заданную глубину, и находятся между собой на заданном расстоянии (межполюсное расстояние - МПР). Специальные циркулирующие устройства на торцах каждой ванны, обеспечивают подачу электролита по всему объему ячейки. Каждая ванна имеет несколько секций и стоит по принципу «сторона к стороне» с параллельно включенными шинами [34].

Для защиты корпуса ванны от коррозионного воздействия электролита внутреннюю поверхность ванны футеруют кислотоупорными материалами. В зарубежной практике для этих целей используют свинец в добавкой 3-6% сурьмы для увеличения жесткости листов.

Вместе с тем все более широкое распространение находит футеровка из поливинилхлорида и других пластмасс. В Российской практике для футеровки ванн чаще всего применяют винипласт и редко свинец. Недостатки винипласта, неэлектропроводного и обладающего хорошими антикоррозионными свойствами материала, является его хрупкость и низкая температурная стойкость, поэтому поиск более подходящих материалов для футеровки ванн продолжается. На Балхашском и Алмалыкском комбинатах проведены успешные испытания футеровки из полипропилена. Ведутся работы по созданию для корпуса ванн материала, сочетающего в себе высокую химическую и температурную стойкость, а также достаточную механическую прочность. Примером такого типа материалов является пластобетон.

Для электрической изоляции ванн от фундаментов основание ванны необходимо устанавливать на плитки или специальной формы изоляторы, изготовленные из неэлектропроводных материалов (стекло, фарфор, диабаз, текстолит).

Обычно в цехах электролитического рафинирования меди имеются три или четыре типа ванн (товарные, матричные, регенеративные, сегрегационные).

В рабочих или товарных ваннах происходит процесс электролитического рафинирования меди. Аноды для этих ванн получают в результате огневого рафинирования черновой меди. Катодами служат катодные основы - медные листы с прикрепленными к ним ушками, изготовленные в специальных матричных ваннах.

Аноды матричных или заготовительных ванн также обычные, но несколько больших размеров, чем в товарных ваннах в соответствии с размерами заготовки для катодов товарных ванн. При изготовлении катодных основ требуется обрезать кромки листов. Катодами в матричных ваннах служат либо полированные медные листы, предварительно смазанные маслом (соляровое масло, солидол, керосин и др.) для облегчения снятия осадка, либо листы из нержавеющей стали или

титана. Матрицы из нержавеющей стали получили применение на некоторых заводах (Алавердский ГМК, Кыштымский МЭЗ), но более перспективными являются матрицы из титана, опыт работ с которыми уже накоплен на Российских (Норильский ГМК), Московский МЭЗ, Алмалыкский ГМК и зарубежных (США, Замбия) предприятиях.

Регенеративные ванны используют для обезмеживания электролита, отобранного на регенерацию. Катодами в них являются листы из чистой меди, а анодами - листы из свинца с добавкой до 8% сурьмы.

В сегрегационных ваннах катоды и аноды такие же как в товарных ваннах, но благодаря пониженной циркуляции электролита и отбору вытекающего раствора с двух уровней, в них получают верхний слив с пониженным содержанием меди. Этот раствор направляют на переработку в отделение регенерации.

В практике используют две схемы подключения электродов и ванн в электрической цепи: последовательное соединение ванн и параллельное соединение катодов и анодов в ванне (система мультипл) а также параллельное соединение ванн с последовательным соединением в ванне биполярных электродов (система сериес). По последней схеме работает в настоящее время только один медный рафинировочный завод Лаурельшл в США[83,84,69,56].

По первой схеме катоды и аноды завешиваются в ванне через один (24-49 штук, причем катодов на один больше, чем анодов) и подключаются параллельно. Расстояние между центрами одноименных электродов 90-120 мм. Ванны подключают к источнику тока последовательно. Они объединяются в блоки, а несколько блоков - в серии. Серия питается от самостоятельного источника постоянного тока в качестве которого в настоящее время на Российских и зарубежных заводах работают полупроводниковые (чаще кремниевые) преобразователи переменного тока в постоянный.

Электрический ток подводится к серии по главным шинам, сделанным из нескольких медных или алюминиевых полос. На продольном внешнем борту крайней ванны укрепляют медную гребенку, в пазы которой вставляют концы катодных ломиков. Катодный ломик второй ванны опирается на конец анода первой ванны, или тот и другой опираются на промежуточную шину, и так до последней ванны серии, на борт которой укладывается медная шина, подключенная к положительному полюсу источника тока. На эту бортовую шину опираются ушки анодов. Промежуточные шины обычно делаются и в том случае, когда катодный ломик опирается на головку анода соседней ванны для более равномерного распределение тока между электродами в ванне. Между отдельными блоками ванн в серии ставят переходные шины.

Загрузку анодов в ванны, а также завеску ванн катодными основами производят при помощи специального устройства "бороны", представляющего собой железную раму с крюками по бортам,

прикрепленными на определенном расстоянии друг от друга). За один прием загружают или выгружают все одноименные электроды одной ванны или их половину. На некоторых заводах для загрузки анодов используют специальные скобы, которые на производстве называют "лягушками". В этом случае аноды загружают в приема.

Продолжительность растворения анодов в ванне зависит от принятой плотности тока толщины анодов и колеблется от 18 до 38 суток. Наряду с электрохимическим растворением анодов вблизи поверхности электролита имеет место химическое растворение меди по реакции (1.26). Для предупреждения обрыва анодов периодически корректируют уровень электролита в ванне или смазывают аноды на уровне поверхности электролита кислотостойкой краской. После достаточно полного растворения анодов оставшиеся нерастворившиеся части анодов (анодный скрап) выгружают из ванны, отмывают от шлама прямо на "бороне" горячей водой в переносном баке и направляют в переплавку. Выход анодного скрапа составляет 13-20% от массы анодов в зависимости от состава и качества отливки анодов.

Время наращивания катодов в ванне обычно составляет половину (иногда третью часть) времени растворения анодов. Масса катодов колеблется от 50 до 136 кг. Перед выгрузкой катодов серию отключают от электрической цепи и прекращают циркуляцию электролита. Катоды поднимают бороной над ванной на 5-10 см, выдерживают 30-50 с и затем транспортируют в катодомоечную машину, где катоды тщательно отмывают от электролита горячей чистой водой и паром в несколько стадий. Промывку ведут душирующими устройствами и в ваннах, заполненных водой. Промытые катоды пакетируют и направляют в переплавку. Новые катодные основы завешивают в ванну через 25-30 мин после выгрузки катодов (время, необходимое для отстоя шлама) и затем включают циркуляцию [11,20,87].

На современных предприятиях по производству меди применяют специальное оборудование для автоматизации производственного процесса, включая роботизированные комплексы для сдирки катодной меди. Они отличаются высокой скоростью обработки катодной поверхности – матрицы, и высоким уровнем автоматизации. Линия сдирки в цехе электролиза меди представляет целую линию, которая позволяет обрабатывать в два раза больше матриц по сравнению с устаревшими способами. Устройство имеет функции автоматизированного пробоотбора меди в виде темплетов тремя специальными прессами. Многофункциональное оборудование выполняет целый комплекс задач, управляемых одним оператором. Специальные сканеры на машине считывают QR-код, и контролируют качество работы каждой матрицы. Это является примером положительного и эффективного внедрения автоматизированного контроля в электролизном производстве меди.

1.4 Состояние АСУ ТП в производстве меди

Все затраты на электролитическое рафинирование меди чаще всего окупаются прибылью от последующей реализации извлекаемых благородных и редких металлов. Подлежащую электролитическому рафинированию черновую медь предварительно рафинируют огневым способом до достижения содержания меди 98,0 – 99,5%. Электролиз на всех медеэлектролитных заводах ведут в водном растворе сульфата меди, содержащем свободную серную кислоту. В результате разности потенциалов между электродами ванны происходит электрохимическое растворение меди на аноде и осаждение чистой меди на катоде. Большая часть примесей, содержащихся в анодной меди, осаждается на дне ванны в виде шлама, меньшая часть переходит в раствор, загрязняя электролит [54,78,60].

Примеси, содержащиеся в анодной меди, могут оказывать значительное влияние как на ход технологического процесса электролитического рафинирования меди, так и на качество катодного продукта.

Для гидрометаллургического передела характерна работа с большим количеством промышленных растворов и на их оборот, содержащих ионы различных металлов, следует обращать особое внимание. Извлечение ионов металлов из промышленных сточных вод часто затруднено из-за сложного химического состава растворов и высоких затрат на рекуперацию, поскольку сточные воды, как правило, содержат лишь незначительные концентрации ценных металлов.

Использование методов химического осаждения для очистки оборотных растворов не всегда представляется возможным для некоторых предприятий, хотя данные методы наиболее распространены благодаря своей эффективности и невысокой стоимости. Но образование большого количества нерастворимых осадков, например при использовании известняка, которые также необходимо утилизировать, заставляет искать новые методы очистки растворов.

Одним из таких методов может быть использование электроэнергии особенно на предприятиях, использующих гидрометаллургический передел для получения медного продукта высокой чистоты. Но из-за низкого содержания ионов меди в оборотных растворах подобный метод может стать очень энергозатратным (при низкой концентрации меди лимитирующей стадией является диффузионная). Однако, с точки зрения экологии, данный метод «чистый» и одностадийный, к тому же не образует вторичных отходов.

Следует отметить, что для устойчивого получения меди высоких марок необходимы точные данные об источниках поступления примесей в катодную медь. Требуется сведения о вкладе отдельных механизмов и их интенсивности, в зависимости от величины и сочетания управляющих технологических параметров. Таким образом, для изучения механизма попадания примесей

требуется сбор данных о ходе процесса и последующий глубокий анализ технологических процессов в целом[95,86]. Необходима также разработка определенных средств и методов, которые позволили бы надлежащим образом воздействовать на механизмы включения примесей в катодный осадок.

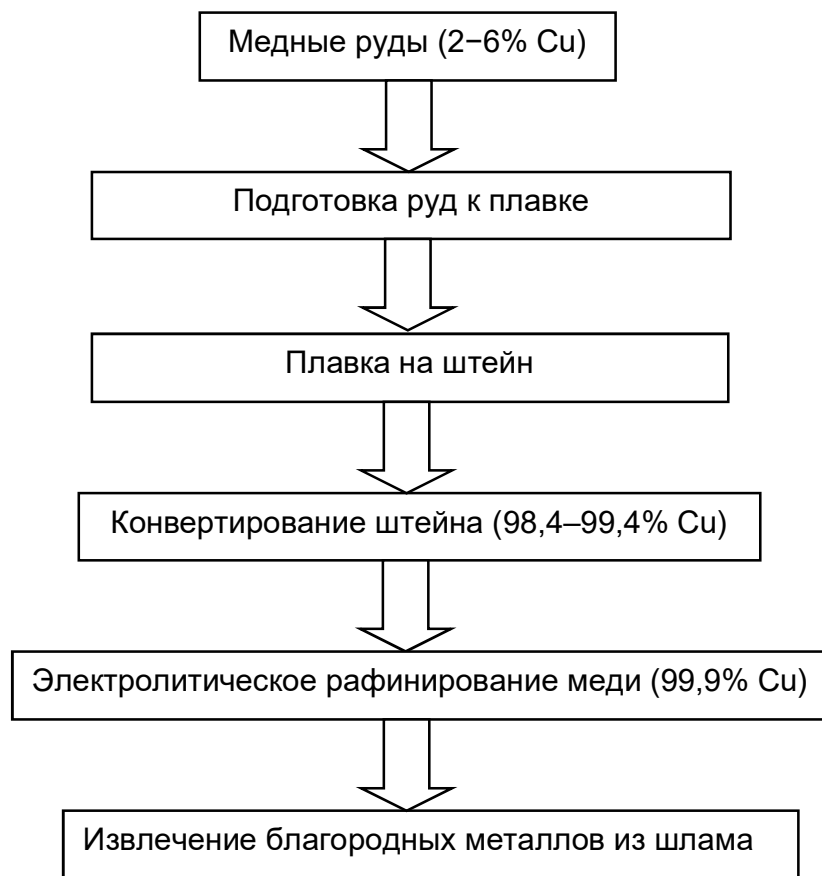


Рисунок 1.7 – Технологическая схема производства меди на медеплавильном заводе Лаокай[108,97,99]

После электролитического рафинирования полученный анодный шлам используют для извлечения благородных металлов. Печной газ, содержащий SO_2 , используется для производства серной кислоты.

Производство меди на вьетнамском медеплавильном заводе Лаокай включает следующие операции: подготовку руд к плавке; плавку на штейн; конвертирование штейна; плавку и разливку на аноды, электролитическое рафинирование меди.

Краткая технологическая схема может быть представлена в следующем виде (рисунок 1.7).



Рисунок 1.8 – Электролизный цех на медеплавильном заводе Лаокай (Вьетнам).

Основной проблемой является то, что технологический процесс на данном медеплавильном заводе во Вьетнаме сильно устарел, и уровень автоматизации находится на примитивном уровне (рисунок 1.8). Это приводит к большому расходу сырьевых и топливно-энергетических ресурсов, что существенно сказывается на конечной цене продукции. Это происходит даже несмотря на то, что электролитическое рафинирование меди имеет большой удельный расход электроэнергии, но из-за несовершенства контроля и управления основными параметрами процесса значительно затрудняется процесс развития медного производства в данном регионе, даже несмотря на наличие сырьевой базы. Сбор и анализ параметров с основных технологических узлов позволяет корректировать ведение любого технологического процесса, но на данном этапе развития автоматизации и работы с базами промышленных данных на медеплавильном заводе Лаокай это представляется проблематичным. Сбор информации о таких параметрах, как температура и состав электролита, межполюсное расстояние, содержание и уровень шламовых осадков в электролитной ячейке, говорит о том, что они являются функционально зависимыми друг от друга. Частота измерений параметров и сбор информации для системы автоматизированного управления (САУ) представляет определенные трудности. Основной причиной энергетических потерь во время электролитического рафинирования меди являются короткие замыкания, вызванные нарастанием дендритов между электродами (срастание электродов). Материальные потери связаны с образованием шлама в электролизной ванне и с нарушением баланса по драгоценным металлам, которые всегда присутствуют в производстве меди[62].

1.5 Современные тенденции и практика производства меди

В Российских медных компаниях (ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», АО «Русская медная компания» (РМК), ПАО «ГМК «Норильский никель»)), несмотря на типовое оборудование электролитических ячеек, существуют различные подходы в управлении производством. Общей тенденцией является переход к цифровой трансформации, а также от локальных ручных аналоговых измерений к многофункциональному контролю и управлению при помощи нейронных систем[49].

Анализ производства может быть построен на математико-статистической обработке больших массивов данных по химическому составу технологически связанных продуктов электролиза. Для этого на предприятии должна быть отлаженная система накопления данных о составе основных технологических параметров, например: анодных плавок, катодных выгрузок, концентрации компонентов электролита, продолжительности анодных и катодных кампаний, данных о межполюсном расстоянии и других важных технологических показателях. Часто все эти огромные массивы данных идентифицируются только на основе календарных сроков их получения. При этом может не учитываться, что, например, химические составы анодов и шламов, датированные одним и тем же числом, технологически совершенно не связаны друг с другом, поскольку шламы формировались из анодов, которые были загружены тремя неделями ранее, а аноды, которые попали в загрузку, были выплавлены еще раньше. В связи с этим все данные должны быть специально подготовлены для синхронного представления с учетом времени[44].

Создание цифровой системы контроля основных параметров с вводом дополнительных точек контроля и сбора информации во время всего процесса электролитического рафинирования меди для быстрой оценки функциональных связей является актуальной задачей, которую возможно решить, используя опыт как Российских, так и зарубежных предприятий.

В настоящее время существуют передовые практики и технологии, связанные с разработкой автоматизированных систем управления основных переделов получения меди из руды и переработки медного лома. Такие компании, как АО «Русская медная компания», ПАО «Норильский никель», «KazMinerals» (Казахстан), «Cuprum» (Чили) и другие, успешно используют разработки с учетом современных требований по цифровизации технологических процессов. Сотрудники института «Гипроникель», Санкт-Петербургского горного университета, Южно-Уральского технического университета принимают активное участие в разработке подобных технологий и их внедрении в действующие производства.

На современных предприятиях по производству меди из руды или по переработке медного лома необходимо учитывать непростую инфраструктуру, удаленность объектов и их

многопрофильность. Вопросы, связанные с оптимизацией металлургических процессов, должны быть учтены при постановке задач комплексной автоматизированной системы управления. Все основные этапы переработки или производства меди неразрывно связаны и имеют свою специфику. Комплексная система управления должна увязывать воедино управление отдельными процессами и производствами. Система управления должна делать производственную картину структурированной, последовательной и функционально законченной [22].

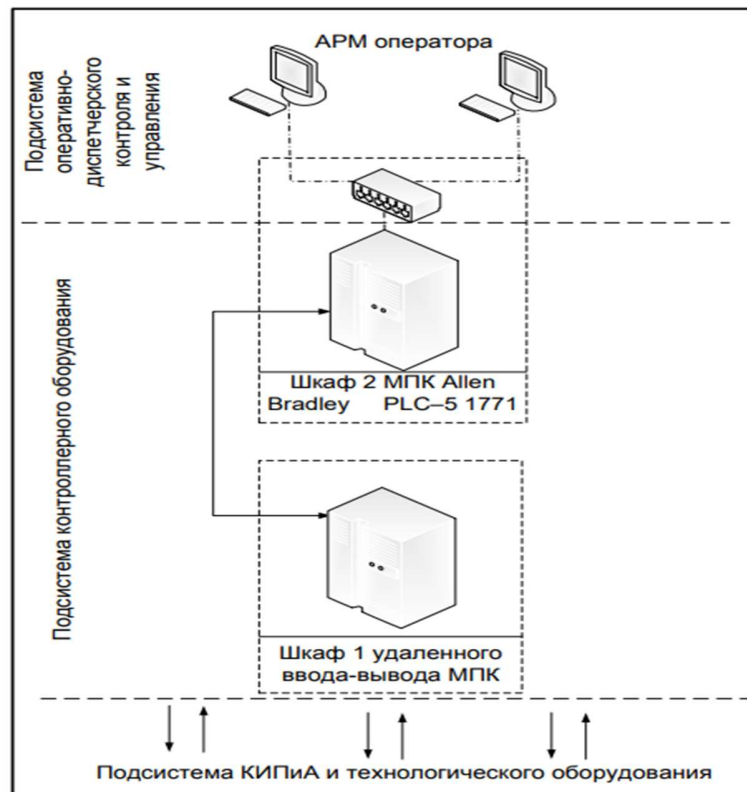


Рис. 1.9 – Структура АСУ ТП электролизных участков, медный завод[31].

Примером современной САУ медэлектrolитного завода может являться САУ медного завода ЗФ ГМК «Норильский никель». Система автоматизации построена на современных ПЛК компании Rockwell Automation, «включает подсистемы автоматического контроля и регулирования расхода пара на подогрев электролита в калориферах, температуры электролита в электролизных ваннах; системы автоматического контроля и защиты промывочных машин (ПМ) по температуре и рН конденсата; уровня в сборниках чистого и грязного электролита; приточных камер (ПК) по перепаду давлений на входе и выходе, а также температуре на сливе с ПК(рисунок 1.9). Особенностью САУ является наличие систем автоматического дозирования поверхностно-активных веществ (ПАВ) вводимых в состав электролита, а также системы автоматического контроля,

регулирования и учета расхода и температуры ТВГС, электропотребление, объемы и рН стоков на выходе с ЦЭМ»[31].

1.6 Цель и задачи исследований

Цель работы: снижение расхода электроэнергии процесса электролитического рафинирования меди и увеличение извлечения полезных компонентов.

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 соответствии с уровнем шламовых осадков за счет ввода дополнительных параметров.
3. Разработать алгоритм контроля и ликвидации дендритных образований между электродами во время процесса электролитического рафинирования меди на основе цифрового двойника для обеспечения устойчивой работы электролитической ячейки, а также для оперативных управляющих воздействий в устранении отклонений.
4. Обосновать выбранные дополнительные параметры контроля для введения их в АСУТП электролитического получения катодной меди в условиях ограничения амперной нагрузки.

Выводы к главе 1

В первой главе диссертации был проведен обширный анализ мировых ресурсов сульфидных и оксидных медных руд, а также оценены запасы меди по странам. Исследование позволило выявить текущее состояние и потенциал добычи меди в различных регионах мира.

Также была проанализирована динамика производства меди в мировом масштабе, что позволило выделить основные тенденции и факторы, влияющие на объемы производства. Особое внимание было уделено технологическому процессу производства меди, включая методы электролитического рафинирования. Рассмотрение этого процесса позволило определить ключевые этапы и технологические особенности, а также выявить возможные направления для оптимизации производства и повышения его эффективности. Дополнительно было проанализировано состояние автоматизированных систем управления технологическим процессом в производстве меди. Это позволило оценить уровень автоматизации и внедрения современных технологий в данной отрасли.

В целом, результаты первой главы позволяют лучше понять современное состояние и перспективы развития производства меди, а также выявить потенциальные направления для дальнейших исследований и практических применений.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных в диссертации задач разработан комплекс мер, предусматривающий проведение теоретических и лабораторных исследований, полупромышленных испытаний, а также разработку новых технических решений для контроля технологических параметров электролиза катодной меди. С целью снижения расхода электроэнергии процесса электролитического рафинирования меди и увеличения извлечения полезных компонентов, идея работы заключается в установке дополнительных мест контроля, для расширения базы данных и создания цифровой системы мониторинга, направленной на повышение управляемости процесса электролитического рафинирования меди.

2.1 Анализ и выбор метода исследования для обнаружения коротких замыканий

В последние годы неразрушающий контроль (НК) в металлургии, а особенно в производстве катодной меди, переживает стремительное развитие. Этот процесс включает в себя не только разработку новых методик и технологий, но и создание более совершенного оборудования, основанного на последних достижениях в области электроники и вычислительной техники. В результате этого происходит постоянное расширение возможностей неразрушающего контроля, а также повышение требований к квалификации персонала, работающего в этой области. В частности, в металлургии неразрушающий контроль играет ключевую роль в обеспечении высокого качества производства, позволяя выявлять дефекты и контролировать процессы на всех этапах производства меди, от ее добычи до окончательного рафинирования. Новейшие методики НК позволяют проводить более точные и эффективные исследования, что способствует повышению производительности и улучшению качества конечного продукта. Важно отметить, что развитие неразрушающего контроля в металлургии не только улучшает технологические процессы и экономическую эффективность, но также способствует повышению безопасности и устойчивости производства. Диагностика металлургических агрегатов без нарушения целостности проводится различными физическими методами и средствами неразрушающего контроля.

2.1.1 Неразрушающий контроль.

Неразрушающий контроль (НК) представляет собой процедуру, направленную на оценку надежности как самого объекта, так и его компонентов, без необходимости их разборки или вывода из эксплуатации. Этот метод основывается на специальных техниках, позволяющих провести проверку, не нарушая целостность объекта. Основой для этих методов и средств служит исследование физических принципов, которые позволяют сохранить интегритет объектов и их

эксплуатационные характеристики. Согласно ГОСТ 18353-79 методы неразрушающего контроля классифицируются на следующие виды[1,36]:

Визуальный измерительный метод дефектоскопии

Визуальный измерительный контроль (ВИК) является основным методом дефектоскопии, который отличается высокой информативностью, экономичностью и быстротой выполнения. ВИК обычно предшествует другим методам контроля. При визуальном осмотре специалисты анализируют качество подготовки заготовок для сварки, а также исполнение сварных швов и определяют состояние металла. Основной задачей визуального контроля является выявление видимых дефектов, таких как ржавчина, наплывы, вмятины и прочее[98].

Визуальный контроль может быть выполнен невооруженным глазом или с использованием оптических приборов, таких как зеркало, лупа или эндоскоп. Важной особенностью этого метода является его простота и доступность для использования обычных измерительных инструментов. В настоящее время для визуального измерительного контроля широко применяются более совершенные приборы, способные обнаруживать даже мельчайшие дефекты. Этот метод необходим для оценки состояния материала и сварных соединений. Требования к выполнению процедуры прописаны в соответствующих руководящих документах по оценке состояния сооружений и технических устройств.

Ультразвуковой метод

Ультразвуковой контроль, предложенный советским ученым С.Я. Соколовым в 1928 году, является одним из основных методов неразрушающего контроля[52]. Ультразвуковая дефектоскопия применяется в широком спектре областей, включая проверку сварных соединений, трубопроводов, аппаратов высокого давления и различной другой продукции. Множество изделий, таких как рельсы для железнодорожного сообщения, элементы авиационных двигателей, трубопроводы атомных реакторов и другие, требуют ультразвукового контроля для обеспечения безопасности тысяч людей. Несмотря на преимущества, ультразвуковой метод также имеет свои недостатки. В частности, он не обеспечивает информации о реальном размере и характере дефекта. Кроме того, при контроле металлов с крупнозернистой структурой могут возникать трудности из-за рассеяния и затухания ультразвука, а также высоких требований к поверхности контроля[85].

Радиографический метод

Радиографический контроль (РК) основан на зависимости интенсивности гамма-излучения, проходящего через исследуемый объект, от его материала и толщины. Присутствие дефектов выявляется через неравномерность поглощения излучения. Для анализа строения объекта контроля регистрируется распределение излучения на выходе.

Радиографический метод позволяет обнаруживать дефекты минимальных размеров, однако эффективность зависит от их формы и местоположения. Наиболее легко обнаружить дефекты, совпадающие с прямолинейным пучком излучения, что позволяет получить четкое изображение границ на рентгеновском снимке (в сравнении с дефектами криволинейной формы)[55].

Капиллярный метод

Капиллярный контроль считается одним из наиболее чувствительных методов неразрушающего контроля. Он основан на способности специальных жидкостей проникать в поверхностные и сквозные дефекты материалов. В процессе капиллярной дефектоскопии индикаторные жидкости оставляют следы, которые могут быть визуально обнаружены или зарегистрированы при помощи преобразователя. Этот метод позволяет определить местоположение, протяженность и ориентацию дефекта на поверхности материала. Стандартные процедуры капиллярного контроля описаны в ГОСТ 18442-80.

Капиллярная дефектоскопия применяется в случае, когда дефект слишком мелкий, чтобы его можно было обнаружить визуальным и измерительным контролем. Этот метод подходит для контроля объектов различных размеров и форм. Кроме того, он применим к широкому спектру материалов, включая металлы и сплавы (как цветные, так и черные) и неферромагнитные материалы, такие как стекло и пластмасса. Капиллярная дефектоскопия также может быть использована для контроля объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, когда использование магнитопорошкового метода невозможно по каким-либо причинам.

Магнитный метод

Магнитный контроль представляет собой комплекс методов неразрушающего контроля, предназначенных для выявления дефектов в ферромагнитных металлах и сплавах. Методика магнитной дефектоскопии позволяет обнаруживать различные дефекты, такие как включения неметаллического происхождения, трещины, волосовины и флокены. Дефекты могут быть обнаружены на поверхности изделия или на небольшой глубине (2-3 мм).

Основной принцип магнитных методов заключается в изучении магнитных полей рассеяния возле ферромагнитных материалов, подвергнутых намагничиванию. Перераспределение магнитных потоков и формирование магнитных полей рассеяния указывают на наличие дефекта и его местоположение.

Электромагнитный метод

Вихревой контроль представляет собой метод неразрушающего контроля, основанный на взаимодействии электромагнитных полей - внешнего и поля вихревых токов, создаваемых в объекте контроля. Физик из Франции Араго в 1824 году первым заметил явление вихревых токов,

отметив, что медный диск, находящийся под магнитной стрелкой, вращается за счет воздействия вихревых токов[17,2,21].

Вихретоковый метод позволяет не только выявлять дефекты и оценивать свойства контролируемых объектов, но также широко используется в производстве деталей и их ремонте. С использованием современного высокоточного оборудования обработка и хранение больших объемов данных о результатах контроля становятся возможными. Автоматизированные системы сканирования увеличивают точность визуализации объекта контроля в несколько раз, что значительно повышает эффективность метода.

Тепловой (тепловизионный) метод

Тепловой метод неразрушающего контроля основан на фиксации и преобразовании инфракрасного излучения в видимый спектр. Он применяется в различных промышленных областях, где состояние объектов может быть оценено по неоднородности теплового поля. Сегодня тепловой метод неразрушающего контроля находит широкое применение в строительстве, производстве и теплоэнергетике. В связи с принятием нового закона о регламентировании энергоаудита объектов, направленного на экономию ресурсов, интерес к тепловому контролю усилился. В настоящее время этот метод является основным средством оценки состояния объектов.

Тепловой контроль обладает рядом преимуществ, таких как универсальность применения, оперативность и большая производительность. Кроме того, его можно осуществлять дистанционно. Существует несколько видов методов, включая контроль плотности тепловых потоков, контроль температуры, контроль теплопроводности и тепловизионный контроль.

На современных металлургических предприятиях широко используется автоматизированный тепловой контроль, который заменяет традиционный визуальный метод контроля[29,110,87]. Преимущества теплового метода по сравнению с другими методами неразрушающего контроля в производственных условиях включают:

- всесезонность;
- применимость в рабочих режимах эксплуатации;
- точность и достоверность результатов;
- доступная цена;
- высокая информативность (по всей контролируемой поверхности объекта) и наглядность;
- высокая производительность контроля;
- безопасность, бесконтактность и дистанционность (в отличие от ультразвука и рентгена);

- широкие возможности программно-аппаратной реализации, в том числе методов обработки;
- неограниченность перечня контролируемых объектов;
- высокая скорость обработки информации;
- высокое линейное разрешение;
- теоретическая возможность контроля любых материалов;
- многопараметрический характер испытаний;
- возможность взаимодополняющего сочетания теплового контроля с другими видами неразрушающего контроля.

Уточненной частью цели данной диссертационной работы является автоматизация операций визуального контроля с использованием тепловизионного неразрушающего контроля для мониторинга текущего технологического состояния электролизеров. В связи с этим важно рассмотреть природу и особенности данного метода применительно к электролизерам, работающим с серно-кислотными электролитами, которые являются токсичными для здоровья человека. Электролизеры представляют собой сложные многофункциональные технические объекты с диссипативными технологическими параметрами, поэтому важно учитывать особенности их мониторинга и контроля с использованием тепловизионного метода[73,74].

2.1.2 Тепловизионный контроль как пример неразрушающего метода диагностики металлургических агрегатов

Металлургические печи состоят из незаменимой наружной части, представляющей собой стальной кожух, и внутренней сменной, выполненной из футеровочного материала, который подвергается разрушению вследствие механического и теплового воздействий[32,36]. Для непрерывного неразрушающего контроля состояния футеровки на производстве применяют тепловизоры, которые позволяют оценить распределение температуры по контуру печи и своевременно выявить аномалии, которые могут сигнализировать о разрушении внутренней части и в итоге привести к аварийным ситуациям.

Применение тепловизоров в металлургии, кроме диагностики состояния футеровки, позволяет сформировать профили распределения температуры по длине печи, контролировать состояние технологического процесса, своевременно регулировать технологические параметры, а следовательно, оптимизировать расход электроэнергии, повысить эффективность производства, минимизировать затраты на восстановление футеровки при своевременном ремонте.

Тепловизионный контроль также имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными способами контроля: высокая скорость и безопасность проведения диагностики, отсутствие необходимости останавливать оборудование для оценки состояния (и как следствие сокращение издержек за счет сведения простоев оборудования к минимуму). Кроме стационарных тепловизоров имеются портативные версии, которые позволяют уменьшить затраты на приобретения оборудования, появляется возможность использовать один комплект оборудования для нескольких металлургических аппаратов[6]. Подбор модели тепловизора осуществляется по верхней границе температурного диапазона измерения. В большинстве случаев на производстве используются тепловизоры, имеющие верхний диапазон измерения 600 °С. Для проведения диагностики сводов печи используются телевизоры с верхним диапазоном 1500 – 2000 °С, имеющие световые фильтры для видимости сквозь пламя[32,36].

Для доменной печи приняты следующие нормативные температуры кожуха: 100 °С при основном сочетании нагрузок; 120 °С при дополнительном; 150 °С при случайном[40]. Поэтому участки печей, имеющие температуру выше 150 °С, принято считать потенциально проблемными, т.е. требующие дополнительной проверки.

Тепловизионный контроль доменных печей позволяет диагностировать кожух, трубопроводы, футеровку и охлаждающие контуры[6].

Тепловизор формирует выходное изображение, используя тепловое излучение (инфракрасное), более горячие детали на изображении приобретают теплые оттенки, детали имеющие низкую температуру – холодные оттенки. За счет этого появляется возможность локализовать участки перегрева печи, обнаружить дефекты футеровки и трещины. На рисунке 2.1 представлена термограмма печи, имеющая неоднородный нагрев кожуха вследствие дефекта футеровки. Для проведения качественного анализа состояния футеровки также используют сравнение текущих термограмм с предыдущими изображениями.

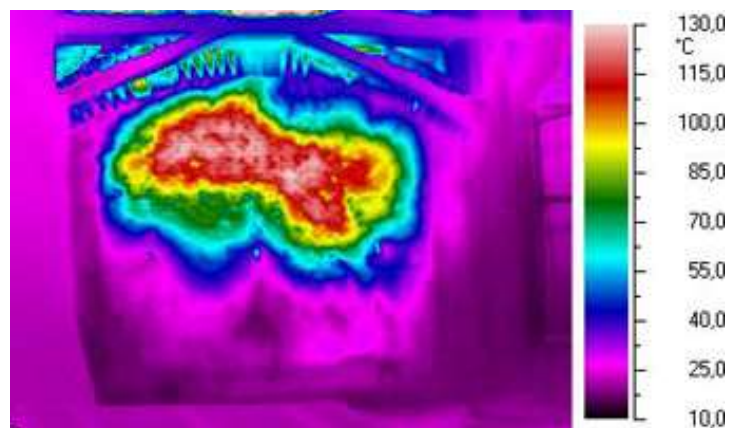


Рисунок 2.1 – Термограмма печи с дефектом футеровки[32,36].

На рисунке 2.2 приведен пример термограммы печи, работающей в штатном режиме с исправной футеровкой. В данном случае наблюдается равномерный прогрев футеровки по всей площади кожуха.

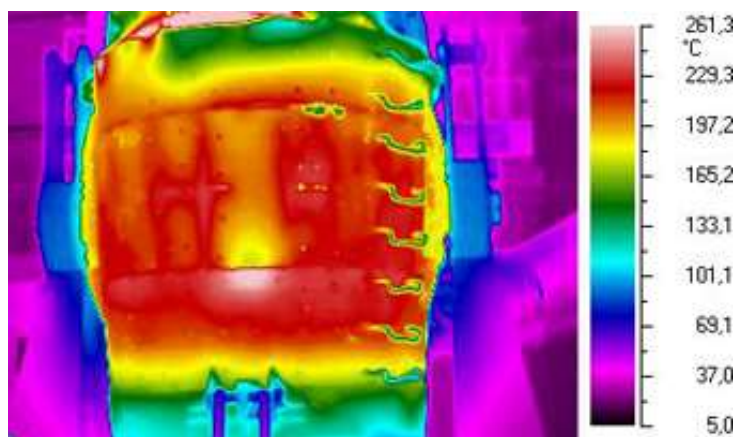


Рисунок 2.2 – Термограмма печи с исправной футеровкой[32,36].

2.1.3 Характеристики тепловизионной камеры

Металлургические производственные предприятия тесно связаны с контролем температуры, особенно в отношении оборудования. Любая неисправность оборудования может привести не только к значительным экономическим убыткам, но и к рискам для безопасности персонала. Поэтому необходимо использовать инфракрасные тепловизионные камеры для регулярного обнаружения объектов, анализа и контроля их состояния с целью предотвращения потенциальных опасностей, обеспечения безопасной эксплуатации и продления срока службы оборудования.

Тепловизионная камера играет ключевую роль в контроле и оптимизации производственных процессов и оборудования в металлургической промышленности. Как надежный бесконтактный инструмент, она позволяет измерять температуру на всей поверхности объекта, а не только в отдельных точках. Благодаря тепловизионным камерам сотрудники могут быстрее, безопаснее и эффективнее выявлять возможные проблемы, что помогает избежать внезапных остановок и сбоев в работе системы. Основные характеристики тепловизионной камеры:

- **Чувствительность:** Это показатель способности камеры реагировать на инфракрасное излучение. Чем выше чувствительность, тем меньшее температурное различие она может обнаружить.
- **Разрешение:** Разрешение тепловизионной камеры определяет, насколько детализированные изображения она способна создавать. Разрешение обычно измеряется в пикселях.

- Температурный диапазон: Это диапазон температур, которые камера способна измерять. Некоторые камеры могут обнаруживать температуры от -20°C до $+2000^{\circ}\text{C}$ и более.
- Частота кадров (кадровая скорость): Это количество изображений, которые камера может захватывать в секунду. Чем выше частота кадров, тем более плавным будет видеозапись.
- Тип матрицы: Тепловизионные камеры могут быть оснащены различными типами матриц, такими как Uncooled Microbolometer, Cooled Focal Plane Array (FPA) и другими. Каждый тип матрицы имеет свои особенности и преимущества.
- Видимый световой канал: Некоторые тепловизионные камеры также могут иметь встроенную функцию видимого света, что позволяет оператору видеть объекты как в инфракрасном, так и в видимом спектре.
- Интерфейсы и функциональные возможности: Камеры могут иметь различные интерфейсы, такие как USB, Ethernet, HDMI и др., а также функции записи видео, анализа данных, подключения к сети и другие.
- Размер и вес: Важные факторы для портативности и удобства использования камеры.
- Цена: В зависимости от всех вышеперечисленных характеристик и бренда, цены на тепловизионные камеры могут варьироваться от нескольких сотен до нескольких тысяч долларов.
- Поле зрения тепловизора (FOV - Field of View) определяет угол обзора, который охватывает камера при создании изображения. Это означает, насколько широко или узко камера может видеть объекты в своем окружении.

$D1, D2, D3$ - Расстояние от тепловизора до объекта измерения, единицы измерения мм.

$X1, X2, X3$ - Ширина обзора по горизонтали, единицы измерения м.

$Y1, Y2, Y3$ - Ширина обзора по вертикали, единицы измерения м.

$S1, S2, S3$ - Минимальный размер объекта "видимый" на заданном расстоянии, единицы измерения квадратный сантиметр.

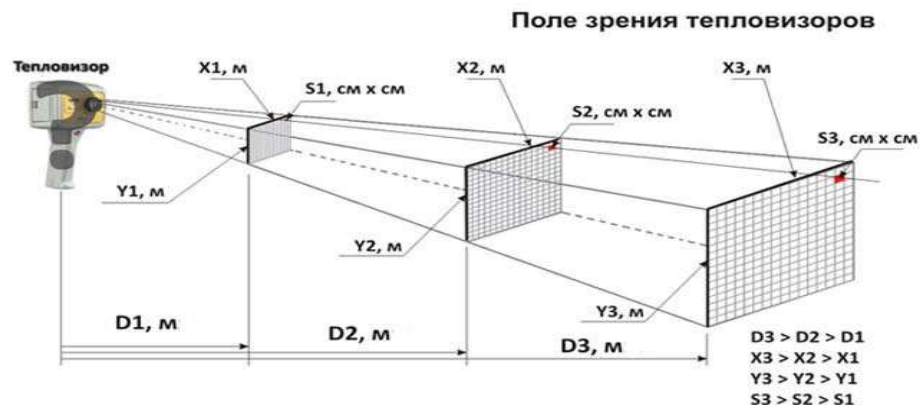


Рисунок 2.3 – Определение поля зрения тепловизоров

iFov (Instantaneous Field of View) - Пространственное разрешение или мгновенный угол поля зрения, измеряется в мили радианах. iFov – Это угол поля зрения, который приходится на один пиксель. Его легко посчитать, зная FOV и количество пикселей детектора, разделив угол поля зрения по одной из осей на соответствующее количество пикселей и переведя значения в мили радианы. Данное значение используется для удобного и быстрого расчета значения S_1 , S_2 , S_3 (iFov помножив на расстояние до объекта в метрах получим значение S в квадратных мм)(рисунок 2.3).

Для корректного измерения температуры объекта необходимо, чтобы он полностью «попадал» в пиксель(рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Корректное измерение температуры объекта.

Физическое изображение объекта проецируется на детекторе тепловизора. При этом, чем дальше находится тепловизор от объекта, тем более размыто будет изображение. Это связано с тем, что с увеличением расстояния между объектом и камерой уменьшается количество деталей, которые могут быть зафиксированы детектором.

Поэтому чем больше пикселей находится на детекторе, тем более четкое изображение мы получим. Иногда, когда стандартное поле зрения тепловизора не соответствует требуемым условиям, его можно изменить с помощью телеобъектива. Такие объективы имеют угол поля зрения меньше стандартного и приближают объект к тепловизору, увеличивая детализацию изображения. В других случаях в тепловизорах используется особая конструкция линз, позволяющая обеспечить более широкое поле зрения. Эти объективы называются широкоугольными и обозначаются как WA (wide-angle). Они применяются там, где нет возможности отойти на достаточное расстояние от объекта для охвата его изменений. Тепловизионные камеры могут быть размещены в статическом положении или перемещаться в соответствии с заданными оператором направлениями с целью захвата части изображения или всего объекта, находящегося на проверке в мастерской. Полученные данные с тепловизионных камер могут быть переданы на центральный компьютер посредством специализированного программного обеспечения для обработки и предоставления визуальных результатов оператору.

2.1.4 Обработка изображений, полученных с тепловизионной камеры

После сканирования заданного участка электролитической ячейки идет передача цветных изображений и их обработка по характерным спектрам. Каждый спектр, в виде модели имеет определенную систему координат с ограниченными областями и пространственными характеристиками внутри этой системы, лимитированных набором правил, по основным критериям модели, где каждый участок области соответствует определенному цвету.

Цветовая гамма спектра RGB (Red, Green, Blue – красный, зеленый, синий) является аддитивной спектральной характеристикой, описывающей способ фиксирования и кодирования для воспроизведения с помощью трех основных спектров. Такая модель широко применяется в при фотографировании и в компьютерной графике, которая основывается на декартовой системе координат, где каждый цвет создается при объединении трех первичных спектров: красного (R), зеленого (G) и синего (B). Пространство для всей гаммы спектра в этой модели представляет собой кубическую форму, которая представлена на рисунке 5. Вершины куба, соответствуют осям координат, и представляют точки основных заданных спектров. Дополнительные источники цвета, такие как белый, голубой, черный, фиолетовый и желтый, располагаются в верхних точках и областях куба (рисунок 2.5).

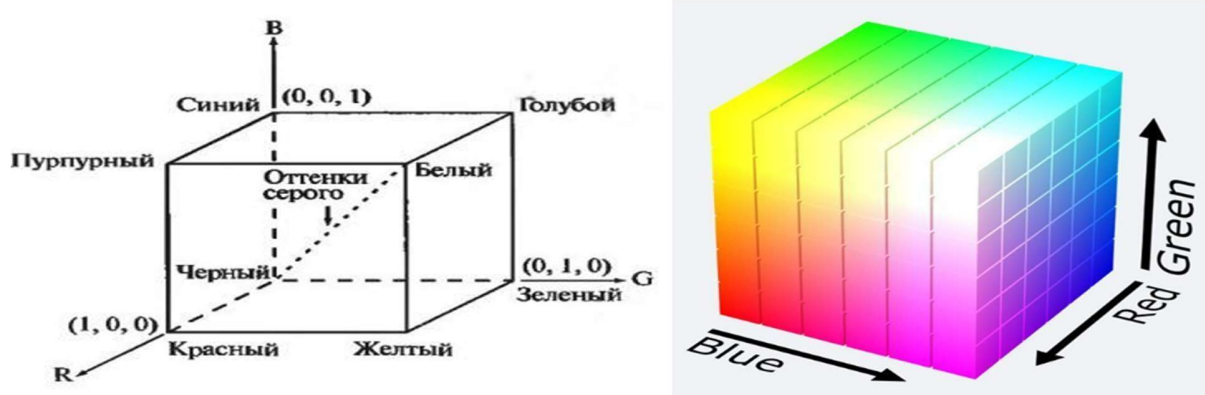


Рисунок 2.5 – RGB-модель зафиксированного спектра

В модели спектра все точки имеют одинаковые значения по RGB, и имеют оттенки серого, которые расположены на диагонали, соединяющей черную и белую области куба. Таким образом все выделенные точки внутри куба, и на поверхности определяют цвет, которые согласуются с вектором, направленным в данную точку. При этом, предполагается, что все значения R, G и B будут нормированы и находится в интервале от 0 до 1.

Цветные участки спектра могут иметь различную глубину, которая задается строгим количеством битов, используемых, в последствии, для кодирования цвета каждой зафиксированной и контролируемой области. Для примера, если после регистрации спектра кодировать цвет для 1

очки изображения 3 битами (по 1 биту на каждый цвет RGB), то получим все 8 различных цветов спектра (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Цветные изображения с характерными тремя битами.

Цвет	R	G	B
Белый	1	1	1
Желтый	1	1	0
Фиолетовый	1	0	1
Красный	1	0	0
Голубой	0	1	1
Зеленый	0	1	0
Синий	0	0	1
Черный	0	0	0

Поскольку в RGB три цветовых канала, глубина цвета в этих режимах равна $8 \cdot 3 = 24$ бит.

Кодирование основных цветов при глубине цвета 24 бита (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Цветные изображения при глубине цвета 24 бита.

Цвет	Интенсивность		
	R	G	B
Белый	11111111	11111111	11111111
Желтый	11111111	11111111	00000000
Фиолетовый	11111111	00000000	11111111
Красный	11111111	00000000	00000000
Голубой	00000000	11111111	11111111
Зеленый	00000000	11111111	00000000
Синий	00000000	00000000	11111111
Черный	00000000	00000000	00000000

Числовое значение пикселя представляет его интенсивность. В полутоновом черно-белом изображении это значение выражает, насколько темным является пиксель, и равно 0 (2^0) для черного пикселя и 255 (2^8) для белого. В цветном изображении каждый компонент пикселя (красный, зеленый и синий) может изменяться в диапазоне от нуля до 255. Ноль представляет черный цвет, а значение 255 - максимально насыщенный цвет (таблица 2.3).

Каждый канал цвета (R, G, B) в формате двоичного представления (восьмибитный формат) и соответствующие им значения в десятичном формате для каждого указанного цвета.

Каждый пиксель изображения имеет значения красной (R), зеленой (G) и синей (B) составляющих, то яркость (Z) точек может быть определена по формуле:

$$Z = R + G + B$$

Это простая формула для вычисления среднего значения интенсивности цвета в каждом пикселе

Таблица 2.3 – Канал цвета (R, G, B) в формате двоичного и десятичного представления.

Цвет	Двоичное представление (R, G, B)	Десятичное представление (R, G, B)
Белый	11111111, 11111111, 11111111	(255, 255, 255)
Желтый	11111111, 11111111, 00000000	(255, 255, 0)
Фиолетовый	11111111, 00000000, 11111111	(255, 0, 255)
Красный	11111111, 00000000, 00000000	(255, 0, 0)
Голубой	00000000, 11111111, 11111111	(0, 255, 255)
Зеленый	00000000, 11111111, 00000000	(0, 255, 0)
Синий	00000000, 00000000, 11111111	(0, 0, 255)
Черный	00000000, 00000000, 00000000	(0, 0, 0)

Определение температуры мест тестируемого объекта на основе яркости точек (0-765) на тепловом изображении может быть выполнено с помощью калибровки тепловизионной камеры. Калибровка камеры позволяет установить соответствие между интенсивностью инфракрасного излучения, полученного камерой, и температурой объектов. Процедура калибровки обычно включает в себя измерение температуры нескольких точек на объекте с известными температурами. Затем для каждой точки на изображении определяется соответствующая яркость пикселя. Эти данные используются для создания калибровочной кривой, которая связывает яркость пикселя с температурой объекта. После калибровки тепловизионной камеры можно использовать откалиброванное изображение для определения температуры объекта путем анализа яркости соответствующих пикселей. Наиболее яркие точки на изображении соответствуют областям с более высокой температурой, а менее яркие точки - с более низкой температурой.



10°С	20°С	30°С	40°С	50°С	60°С	70°С	80°С	90°С	100°С
------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

Рисунок 2.6 – Температурные градиенты в RGB-спектре

Согласно этому правилу, например, чтобы определить, что тестовый объект имеет температуру от 20 °С до 100 °С, цвет полученного изображения будет соответствовать от черного (0) до белого (765) (рисунок 2.6). Используя тепловизионное изображение, можно определить области с повышенной температурой, установив пороговую температуру или яркость пикселя. В данном случае, если установить пороговую температуру на уровне 80 °С, что соответствует яркости пикселя 665 в шкале яркости, пиксели с температурой выше этого значения будут отображаться ярче или более светлыми на тепловизионном изображении.

Это позволяет выявить области с температурой выше установленного порога, что может быть полезно для обнаружения различных аномалий или проблем, таких как короткое замыкание. Области, превышающие установленный порог, будут выделены на изображении более яркими участками, что позволит оператору легко обнаружить потенциальные проблемы или аномалии.

2.2 Экспериментальные исследования в лабораторных условиях

Программа комплексных исследований состоит из решения нескольких задач:

- разработка лабораторной установки для обнаружения коротких замыканий;
- выявление влияния короткого замыкания на температуры электродов;
- анализ зависимости площади дендритного осадка от времени;
- сравнение температуры электролита;
- разработка алгоритмов для определения места и количества коротких замыканий;
- написание и подготовка программы для ЭВМ определения мест и количества коротких замыканий.

2.2.1 Лабораторная установка для обнаружения и фиксирования коротких замыканий

Лабораторные исследования проводились на экспериментальной установке, изображенной на рисунке 2.7, которая состояла из электролизера с электродами (анода и катода), блока управления, тепловизора и компьютера.

Измерения температуры электролита проводились с помощью с помощью температурного датчика 8, размещенного в правом электролизере и соединенного с блоком управления 2. Результаты измерений отображаются на ЖК-экране, установленном на лицевой стороне блока управления, и записываются в файл на диске компьютера 1. Обмен данными между устройствами осуществляется по протоколу Modbus Slave. Над электролизером, на расстоянии 900 мм от дна, установлена тепловизионная камера «Optris PI200» 6 с новой технологией VI-SPECTRAL(Германия) прикрепленная к штативу в лаборатории. В связи с близким расположением к электролизеру, а также с учетом нагрева электродов, испарения раствора электролита и температуры отходящих газов,

видеокамера помещена в защитный корпус 7. Изображения с камеры передаются по кабелю Gigabit Ethernet 4, проложенному внутри кабельного канала, на компьютер для последующей обработки и анализа.

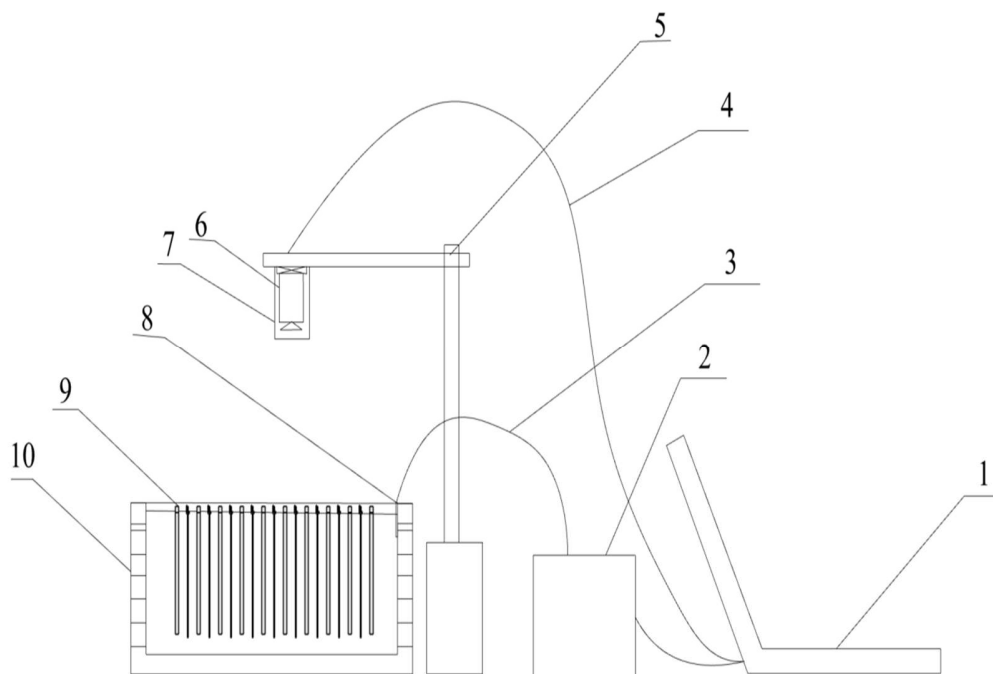


Рисунок 2.7 – Схема лабораторного стенда для изучения оптического спектра расплава: 1 – персональный компьютер; 2 – блок управления; 3 – кабель; 4 – Gigabit Ethernet кабель; 5 – лабораторный штатив; 6 – тепловизионная камера; 7 – защитный кожух для камеры; 8 – датчик температуры; 9 – электроды; 10 – электролизер

В таблице 2.4 представлены характеристики всех лабораторного оборудования.

Таблица 2.4 – Характеристики лабораторного оборудования.

№ на схеме	Наименование оборудования	Характеристики оборудования
1	Персональный компьютер	Intel Core i5, Windows 10 64-бит, оперативная память - 8Гб, физическая память - 500 Гб + пакет специализированного программного обеспечения OptrisConnect 2.0.6.
2	Блок управления	Внешние размеры – 1000x1000x1000, футеровка – шамотный кирпич, рабочая температура – до 1100°C, нагревательные элементы – силитовые стержни по 3 с каждой стороны, питание – 220В

Продолжение таблицы 2.4

3	Кабель	Длина – 1000 мм
4	Gigabit Ethernet кабель	Длина – 2000 мм
5	Тепловизионная камера «Optris PI200»	Температурный диапазон от -20 °С до +900 °С; Погрешность измерений ± 2 °С или ± 2 % при температуре (23 ± 5) °С; Сменные объективы: стандартный, широкоугольный и длиннофокусный; Малые размеры 45×45×62 мм, масса не более 215 г; Высокая чувствительность 0,08 К; Частота кадров изображения 96 Гц; Интерфейс USB 2.0, длина кабеля USB: 1 м, 5 м, 10 м, 20 м; Электропитание 5 В пост. тока (по USB интерфейсу), макс. потребляемый ток 500 мА
6	Защитный кожух для камеры	Габариты – 250x100x100, материал корпуса – нержавеющая сталь, материал наблюдательного окна – органическое стекло, активное охлаждение (питание 12В).
7	Лабораторный штатив	Высота – 1000, длина поперечной перекладины – 400, крепление поперечной перекладины – винтовое.
8	Температуры	Тип: термопары типа К) Диапазон измеряемых t° (от -50°С до +150°С) Точность: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ до $\pm 2^{\circ}\text{C}$
9	Электроды	Катоды: Титан ВТ1-0 Аноды: Нерж.сталь ЭИ-943
10	Электролизер	Размер: 480x370x215 мм

Электролизер лабораторный ЭЗ-1(далее - ЭЗ) представляет собой аппарат для электролитического катодного осаждения растворенных порошков оксидов металлов. Электролизер предназначен для установки в закрытом помещении (лаборатории), оборудованной системой вентиляции и служит для проведения экспериментальных работ. В таблице 2.5 представлены основные технические параметры электролизера.

Таблица 2.5 - Основные технические параметры электролизера

№	Характеристика	Норма
1	Рабочий диапазон температур электролита	10...60°C
2	Система автоматического поддержания температуры электролита	С погружаемым электронагревателем, автоматическим регулятором температуры и системой защиты от перегрева нагревателя
3	Система циркуляции электролита	Принудительная с насосом
4	Производительность насоса номинальная	3 л/час
5	Рабочее давление насоса(не менее)	0,01 МПа
6	Материал электродов: Катоды (количество, не менее)	Титан ВТ1-0 (20 шт.)
7	Аноды (количество, не менее)	Нерж.сталь ЭИ-943 (06ХН28МДТ) (20 шт.)
8	Питающее напряжение/мощность установки	220 В (50 Гц) / 700 Вт
9	Напряжение/ток источника питания	0...6 В / 0...75 А
10	Точность регулирования (плавность настройки): - по напряжению - по току	0,1В 0,1А
11	Габаритные размеры, не более - блока питания - электролизера	400x300x200 мм 480x370x215 мм
12	Продолжительность непрерывной работы(не менее)	240 час
13	Срок службы(не менее)	3 года

Для проведения лабораторного исследования необходимо использовать электролит с химическими составами, указанными в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Химический состав электролита

№ на схеме	Компонент	Концентрация
1	Купорос (CuSO_4)	Приблизительно 200–250 г/л
2	Серная кислота (H_2SO_4)	Приблизительно 30–50 г/л
3	Хлорид натрия (NaCl)	До 10 г/л
4	Вода (H_2O)	До 1 л

Для электролиза меди обычно используют раствор серной кислоты (H_2SO_4) и купороса (CuSO_4), для приготовления электролита:

1. Добавить приблизительно 200–250 г купороса (CuSO_4) в 1 литр воды. Это создаст раствор купороса с концентрацией примерно 200–250 г/л.
2. Добавить приблизительно 30–50 г серной кислоты (H_2SO_4) в этот же литр воды. Это создаст раствор серной кислоты с концентрацией примерно 30–50 г/л.
3. Добавить купорос в воду, затем аккуратно добавить серную кислоту.
4. Перемешать раствор, чтобы обеспечить равномерное распределение всех компонентов.
5. Проверить pH раствора, чтобы убедиться, что он находится в подходящем диапазоне для вашего процесса и концентрация купороса и серной кислоты соответствует требованиям.
6. Прежде чем использовать электролит в процессе электролиза меди, провести тестирование, чтобы убедиться, что он работает эффективно.

2.2.2 Способы ограничения роста дендритов

Многочисленные исследования Российских и зарубежных ученых посвящены образованию медьэлектролитных дендритных осадков на электродах и методам контроля их развития в процессе электрорафинирования меди.

О. Devos и его коллеги в своем исследовании отметили различные характеристики роста дендритов на поверхности электродов в лабораторных условиях электролитической среды. В частности, они изучили рост дендритов электролитической меди между двумя плоскими медными дисковыми электродами диаметром 250 мкм в щавелевой кислоте, используя методику, основанную на комбинации электрохимических измерений и оптических наблюдений на месте. Размер дендрита определялся в режиме реального времени с помощью микровидеоустройства. После обработки изображений рассчитывалась скорость роста дендрита по мере увеличения его длины со временем [63-65].

При резком возрастании переходных токов дендриты быстрее достигают поверхности анода, а затем при дальнейшем росте скоплений вызывают короткое замыкание между двумя медными дисками. В работе[104] установлено, что в зависимости от условий эксперимента существуют два типа морфологии дендритов: нитевидная и иерархически разветвленная более крупная структура. Проведенные ранее исследования показали, что существует несколько способов по ограничению роста дендритов как:

Использование ультразвуковых колебаний для предотвращения коротких замыканий в процессе электролитического рафинирования меди. Ультразвук обладает способностью направлять энергию в нужное направление и обеспечивать её концентрацию и перенос в нужном объёме. Этот метод позволяет непрерывно удалять с катода губчатые осадки, уменьшать разность потенциалов на электродах и, таким образом, препятствовать образованию металлических мостиков, которые вызывают короткое замыкание. Ультразвуковые излучатели крепятся на дно ванны с внешней стороны и создают ультразвуковое поле, распространяющееся в электролите. Это поле обеспечивает постоянное удаление дендритов и предотвращает их рост, что улучшает технико-экономические показатели предприятия, снижает потребление электроэнергии и стоимость производства металла. Таким образом, использование ультразвуковых технологий позволяет значительно повысить эффективность и качество процесса рафинирования меди[37].

Контроль роста дендритов по поверхностной проводимости в нанопорах. Авторы использовали метод изменения поверхностного заряда нанопор для контроля и ограничения роста дендритов. Конкретно, они модифицировали заряд поверхности анодированных алюминиевых оксидных (ААО) мембран с помощью полиэлектролитных покрытий. Положительный поверхностный заряд блокировал рост дендритов и направлял их вдоль центров нанопор, предотвращая их проникновение в мембрану. Отрицательный поверхностный заряд, напротив, способствовал росту дендритов вдоль стенок нанопор[76].

Добавка сульфата бария (то есть «Barytmehl N» и «Blanc Fixe») в раствор. В ходе лабораторных экспериментов было изучено влияние различных типов и концентраций твердых частиц в электролите на рост дендритов при электролитическом рафинировании меди. Добавлялись два типа сульфата бария ("Barytmehl N" и "Blanc Fixe"), диоксид кремния (SiO_2) и анодный шлак. Результаты показали, что "Barytmehl N" способствует росту дендритов и коротким замыканиям больше, чем "Blanc Fixe" и диоксид кремния. В присутствии анодного шлама размер частиц и их химический состав оказывали решающее влияние на рост дендритов. Основные загрязнители, такие как Ag, Se, Te и Pb, были обнаружены у корней дендритов. Сульфат бария также был найден в анодном шламе и у корней дендритов. Анализ микроструктуры выявил образование крупных зерен

перед началом роста дендритов. Исследование показало, что использование диоксида кремния в качестве покрытия для формы лучше, чем сульфата бария, для минимизации роста дендритов. Это связано с меньшей вероятностью индукции дендритного роста при включении частиц SiO₂ в катодное осаждение[94].

Добавить тиомочевины и бензотриазола на образование дендритов при электроосаждении меди из кислых сернокислотных растворов. Авторы выяснили, что добавки влияют на переход от зарядопереносного к массообменному контролю при электролизе. Было установлено, что тиомочевина увеличивает твердость осадков и уменьшает размер зерен, а бензотриазол образует комплекс с медной поверхностью, уменьшая внутреннее напряжение осадка[70].

Было проведено множество исследований, направленных на ограничение роста дендритов во время электролиза меди. Однако на производстве по-прежнему возникают непредвиденные случаи. Дендриты продолжают образовываться в различных формах, снижая эффективность производственного процесса, потребляя значительное количество энергии и уменьшая чистоту катодной меди.

2.3 Способы обнаружения коротких замыканий в процессе электролиза катодной меди.

Нарушения в электрической цепи электролизера приводят к короткому замыканию между анодами и катодами или загрязнению контактов. Это состояние восстанавливается путем простукивания анодов для удаления шлама и обработки водой или паром. В свою очередь, такие нарушения нормального подвода тока к электродам вызывают снижение выхода по току.

2.3.1 Использование гауссметра

Гауссметр – это устройство, с помощью которого можно обнаружить возникновение короткого замыкания. Принцип его работы основан на взаимодействии магнитного поля катодного ломика и подвижного якоря, соединенного со стрелкой гауссметра. В нормальных условиях технологического процесса стрелка показывает величину магнитного поля катодных ломиков. При появлении короткого замыкания стрелка гауссметра отклоняется дополнительно, что позволяет выявить проблему.

Использование гауссметра, прибора для обнаружения сильного магнитного поля, помогает выявить и устранить короткие замыкания и нарушения контактов. Также применяют термоиндикаторную краску, которую наносят на поверхность катодной штанги; при повышении температуры эта краска изменяет цвет. Кроме того, используется тепловизор для мониторинга температурных аномалий.

Недостатком гауссметра является его ограничение в точности измерений, а значительная инерционность подвижного якоря делает невозможным его применение в обработке электролизных ванн с повышенными скоростями.

2.3.2 Использование прибора «Электрод-12»

Был разработан способ обнаружения коротких замыканий, включающий сравнение отрицательного отклонения на двух концах ванны от среднего значения напряжения ванны данной серии с пороговой величиной, отличающейся тем, что, с целью повышения точности обнаружения коротких замыканий, используют два значения пороговой величины: одно – для ванн, имеющих отрицательные значения отклонений на двух концах, а другое – для ванн, имеющих положительный и отрицательный знаки отклонений, причем пороговую величину для ванн с отрицательными знаками отклонений напряжений на двух концах выбирают на 20 – 40% ниже пороговой величины для ванн с отрицательным и положительным знаками отклонений[82].

Для предупреждения коротких замыканий был разработан прибор «Электрод-12», регистрирующий диаграммы тока и на основании ее проводящий настройку ванны. Такая периодическая настройка электродов обеспечивает равномерное распределение тока между всеми электродами в ванне[22].

Имеется специальное устройство, Медведицина С. В. [22] для контроля электролитического рафинирования меди, который имеет интегратор для пиковых значений токов с входом на подключение к датчику магнитного поля, и выход в участок регистрации обработки данных после сравнения характеристик сигнала с индикатором. Данный способ повышает точность обнаружения коротких замыканий на электролизере.

Существует устройство для регистрации коротких замыканий в электролизных ваннах, которое имеет датчик магнитного поля, встроенную схему сравнения и индикатор, для повышения точности обнаружения нескольких коротких замыканий, и интегратор предельных значений тока, вход которого также подключен к датчику магнитного поля, а выход - к входу схемы сравнения, с контактным индикатором.

На рисунке 2.8 представлена блок-схема предложенного устройства; а на рисунке 2.9 – приведены эпюры напряжений, объясняющие принцип действия.

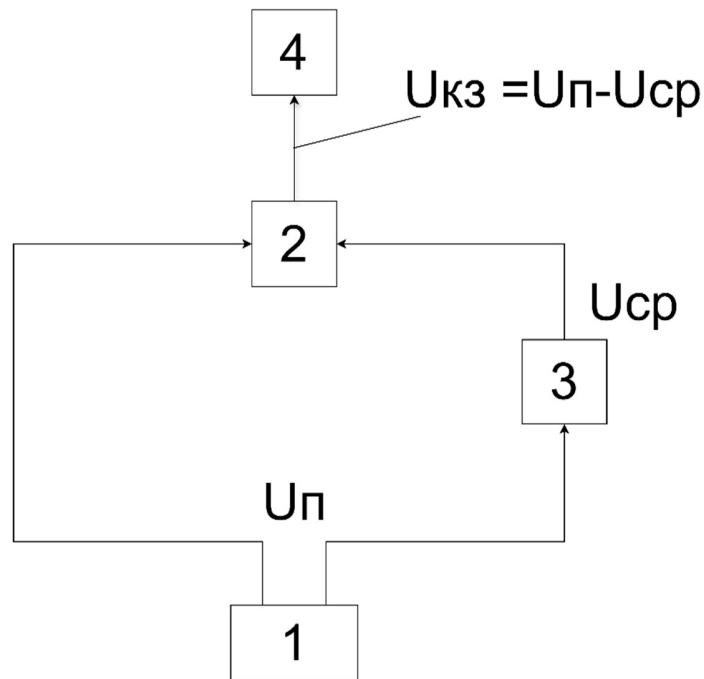


Рисунок 2.8 – Блок-схема специального измерительного устройства

Устройство имеет датчик магнитного поля 1, в виде катушки индуктивности, включенной для сравнительной оценки 2, которая подключена одним входом к датчику 1.

Интегратор пиковых значений токов 3, на входе в цепь подключен к датчику магнитного поля 1, а на выходе к схеме сравнения 2, через индикатор 4, который связан с выходом схемы сравнения 2 (рисунок 2.8).

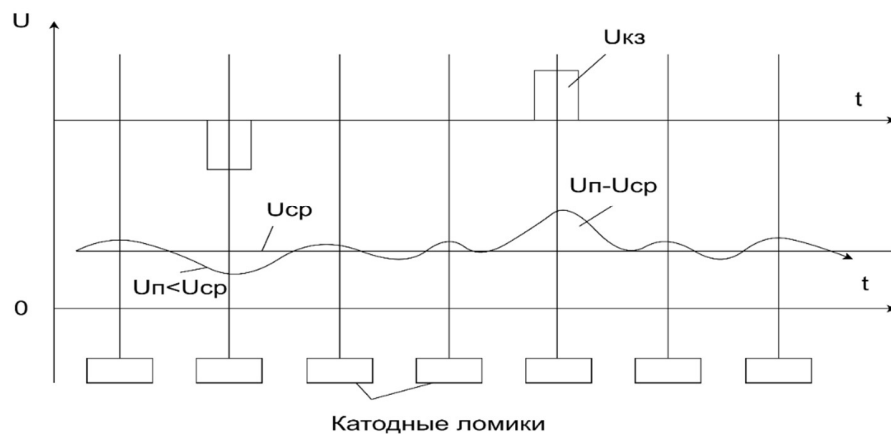


Рисунок 2.9 – Изменение напряжения в ошиновке и между электродами

Принцип работы устройства заключается в том, что перемещение датчика магнитного поля 1 с фиксированной постоянной скоростью происходит вдоль катодных шин перпендикулярно

магнитному полю. По законам электромагнитной индукции при прохождении магнитных полей катодных шин возникает индуцированная ЭДС, пропорциональная значению силы тока, протекающего через весь шинопровод ячейки, и равен скорости перемещения самого датчика магнитного поля 1.

Зафиксированные импульсы пиковых значений тока и напряжения от катодных шин с выхода датчика магнитного поля 1 постоянно поступают в схему сравнения 2. На вход напряжение $U_{п}$ поступает напрямую через интегратор пиковых значений токов 3, в котором пиковые напряжения токов катодных шин преобразуются в постоянное напряжение сравнения, усредняя значение $U_{ср}$ для всех катодных шин, при этом, регистрируется разность пикового напряжения $U_{п}$ и среднего значения пиковых напряжений $U_{ср}$, и формируется сигнал короткого замыкания $U_{кз}$ (2.1).

$$U_{кз} = U_{п} - U_{ср} \quad (2.1)$$

Сигнал по значению напряжения $U_{кз}$ регистрируется через индикатор 4, и при отсутствии короткого замыкания между электродами (2.2)

$$U_{п} \approx U_{ср}, U_{кз} \rightarrow 0; \quad (2.2)$$

при коротком замыкании (2.3)

$$U_{п} > U_{ср}, U_{кз} \neq 0; \quad (2.3)$$

при снижении тока между электродами (2.4)

$$U_{п} < U_{ср}, U_{кз} \neq 0. \quad (2.4)$$

Устройство фиксирует короткие замыкания в электролизных ячейках без дополнительной настройки при обработке данных с различными значениями, так как напряжение $U_{п}$ и $U_{ср}$ изменяются практически одновременно, что повышает точность регистрации коротких замыканий. Устройство обнаруживает замкнутые электроды, и в этом случае сигнал $U_{кз}$ на выходе сравнения 2 имеет отрицательное значение, так как $U_{п} < U_{ср}$.

Преимуществом является то, что такое устройство может работать без аккумулятора используя энергию магнитного поля катодных шин, величина тока через которые составляет 100-250 А, и может быть применено в системах АСУ ТП [105].

2.3.3 Использование устройства «Opti bar Intercell Bars»

Для предотвращения коротких замыканий используется устройство, называемое «Opti bar Inter cell Bars».

При использовании элемента Optibar один катод верхней ячейки соединен с одним анодом нижней ячейки. Такое соединение с «источником тока» выводит ток, протекающий через катод, на

анод. Это делает возможным появление небольшой разности напряжений между ячейками электродов для компенсации сопротивления контакта и выравнивания дисперсий.

Цель данного изобретения - препятствовать образованию коротких замыканий и выравнивание тока между электродами. Короткие замыкания формируются на поверхности катода, когда наблюдается более высокая плотность тока. В этом случае металл аномально растет, в то время как сопротивление электролита постепенно уменьшается. Процесс короткого замыкания в металлургии прогрессирует до тех пор, пока в конечном итоге он не достигнет анода, образующего сплошной электрический путь между анодами и катодами. Это явление сильно снижает эффективность процесса. В устройстве Уокера уменьшение сопротивления между анодом и катодом приводит к интенсивному течению через эти электроды. При использовании Optibar идентичное изменение сопротивления приводит к меньшему отклонению тока. Такое соединение обеспечивает внутреннюю способность выдерживать отклонения параметров. Кроме того, устройство образует предпочтительные контуры для электрического тока или каналов тока. Эти каналы имеют аналогичные эквивалентные сопротивления схемы, создающие сбалансированные токи по всей ячейке. Каждое сопротивление эквивалентной схемы состоит из ряда последовательных контактных и электролитных сопротивлений. Это также означает, что полученные сопротивления будут более сбалансированными по мере увеличения количества ячеек серии. Этот эффект снижает чувствительность системы к изменениям параметров.

Выводы к главе 2

В данной главе были рассмотрены теоретические основы и экспериментальные программы исследований методов неразрушающего контроля. Особое внимание уделено эффективности применения теплового (тепловизионного) и оптического методов для обнаружения коротких замыканий в процессе электролиза катодной меди. Также были проанализированы преимущества и недостатки традиционных методов обнаружения коротких замыканий.

В ходе работы над Главой 2 были сформулированы следующие научные положения, выносимые на защиту:

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.

ГЛАВА 3 ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ РАФИНИРОВАНИЕМ МЕДИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ВО ВРЕМЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕНДРИТНОГО ОСАДКА ГЛАВА

3.1 Изучение влияния степени образования (высоты) дендритного осадка на процесс электролиза катодной меди

Экспериментальная часть. Для проведения опытов использовали лабораторную электролитическую ячейку ООО Научно - Инженерный Центр «Концепт», схожую в уменьшенном масштабе с промышленной ванной. В данной работе представлен способ обнаружения дендритных осадков и своевременного их удаления во время электролиза с помощью тепловизора Optris PI200, встроенного в систему цифрового двойника, который располагается над электролизной ванной объективом камеры вниз перпендикулярно верхней части ванны. Модель с цифровым двойником представлена на рисунке 3.1.

Анодные пластины в ячейке представляют собой электроды из кислотостойкой стали, а катодные - титановые, толщиной 2 мм. Между ними находятся тонкие катодные основы и расстояние между ними равно 20 мм. Электролит, используемый при эксперименте имеет плотность 150 г/дм^3 , и состоит из сульфата меди (II) $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. В течении опытов температуру электролита выдерживали в интервале $50\text{-}60 \text{ }^\circ\text{C}$. Обеспечивали через специальную систему циркуляцию электролита 30 л/час. Напряжение между анодом и катодом составляло $0,35 \text{ В}$. Все измерения вводили в Базу данных (БД) цифрового двойника.



Рисунок 3.1 –Электролитическая установка для обнаружения дендритных осадков

[ООО Научно - Инженерный Центр «Концепт»]: 1 – корпус электролизера; 2 – электроды (аноды и катоды); 3 – блок управления; 4 – система оборота электролита; 5 – штатив с тепловизором; 6 – компьютер с цифровым двойником ПО для контроля процесса

Цифровой двойник подключается к общей системе через ПО для наблюдения за зависимостью температуры электролита от роста дендрита, а также за процессом образования короткого замыкания(КЗ) между электродами используется тепловизор Optris PI200. Тепловизор соединяется напрямую к компьютеру через usb-кабель с поддержкой ПО optris PIX Connect. С помощью оптического разрешения 640x480 пикселей он создаёт чёткие термограммы в режиме реального времени на экране цифрового двойника[96].

Обсуждение результатов исследования. Анализ разных образований дендритного осадка показал, что необходим новый подход и внедрение методы контроля, для быстрого устранения технологических отклонений (образование сплошного дендритного нароста на катоде при пассивации, замыкание между электродами, повышение температуры электролита, замыкание нижней части электродов на шламовый осадок).

В ходе экспериментов установлено, что шлам, осаждающийся при электролитическом рафинирований меди, в основном получается из схода дендритного нароста в осадок ванны. Дендритные наросты могут образовываться из трех основных форм следующим образом:

- Образование дендритного срастания между электродами с замыканием.
- Образование дендритного осадка по всей поверхности электрода с возможной пассивацией катода.
- Локальное образование дендритов на поверхности электрода без срастания.

Судя по предыдущим экспериментальным исследованиям, дендритные может появляться на поверхности катода в различных формах, как показано на рисунке 3.2.

Установлено, что коагулированные отложения (наросты) шлама (рисунок 3.2.б)[71] появляются в основном, в связи с присутствием взвешенных частиц шлама в электролите. В результате переноса и взаимодействия частиц в катодном осадке шламовая частица образует центр кристаллизации, концентрирующий силовые линии и экранирующий окружающий участок поверхности самого осадка, особенно при изменении силы тока. Если на поверхности катода появляются участки, омываемые электролитом с высокой концентрацией восстанавливаемого иона, начинается некоторое вытягивание кристаллитов, и их последующее ответвление (рисунок 3.2.в)[64]. Рост дендритов происходит по направлению потока электролита с повышенной концентрацией в оборотной системе 4, то есть меньшего сопротивления. Такие осадки также наблюдаются, когда электролиз проводится в растворах, насыщенных солями, катионы которых не

участвуют в разряде. Образование игольчатых наростов (рисунок 3.2.а)[103] обусловлено избыточной концентрацией хлорид-иона в электролите, приводящей к образованию на катоде пленки полухлористой меди, вызывающей интенсивное образование центров кристаллизации.



Рисунок 3.2 – Формы дендритных образований на поверхности катода[51-52] (x10): а – игольчатые; б – коагулированные остатки шлама; в- дендритные

Таким образом, подтверждается связь между переходными процессами тока, и изменением скорости роста во времени и морфологией дендритов. Низкие токи осаждения зависят от стабильной скорости роста нитевидных дендритов, в то время как более высокие токи были связаны с увеличением скорости роста во времени и иерархической морфологией самих дендритов. В работе определяли влияние концентраций как щавелевой кислоты, так и сульфата меди на время короткого замыкания и скорость роста дендритов. Таким же образом, был доказан эффект изменения разности потенциалов между двумя электродами при наросте дендритов на поверхности. Ламинарный поток задавали при помощи системы подачи и циркуляции электролита при различных значениях МЭП и скоростях электролита. Также установлено, что принудительная конвекция на поверхности электрода во время электроосаждения снижает рост металлических дендритов на 97,7–99,4%. Кроме того, высокая скорость потока приводила к мгновенному установившемуся току и установившемуся потенциалу при подаче постоянного напряжения и постоянного предельного тока соответственно[107,38].

Используя полученные данные создали 3D-модели для различных типов механизмов. Что касается механизма образования дендритов доказано, что существует 3 механизма образования дендритов:

Первый механизм: Образование дендритного осадка по всей поверхности электрода с возможной пассивацией (рисунок 3.3).

В функции модели цифрового двойника входят выборочный контроль амплитуды напряжения на электролизной ванне между электродами, сканирование тепловизором для определения роста температуры электрода, обработка данных при изменении фона, принятие решение о ликвидации наростов, контроль уровня электролита на дне ячейки после разрушения срастания.

После получения и обработки и преобразования полученных данных цифровой двойник обеспечивает управляющее воздействие, например, снижение межэлектродного пространства (МЭП), и последующее разрушение с механическим удалением осадка специальным инструментом.

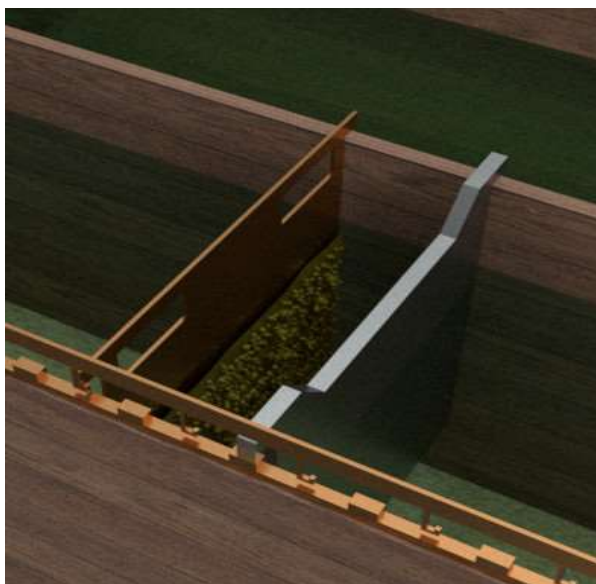


Рисунок 3.3 – 3D-модель дендритов с распределением по всей поверхности электрода

Второй механизм: локальное образование дендритного осадка на поверхности электрода без срастания (рисунок 3.4).

Методы контроля: выборочный контроль амплитуды напряжения на электролизной ванне, сканирование тепловизором для определения роста температуры электрода (изменение фона).

Способ устранения (управляющее воздействие): разрушение вибрацией или механическим удалением осадка специальным инструментом.

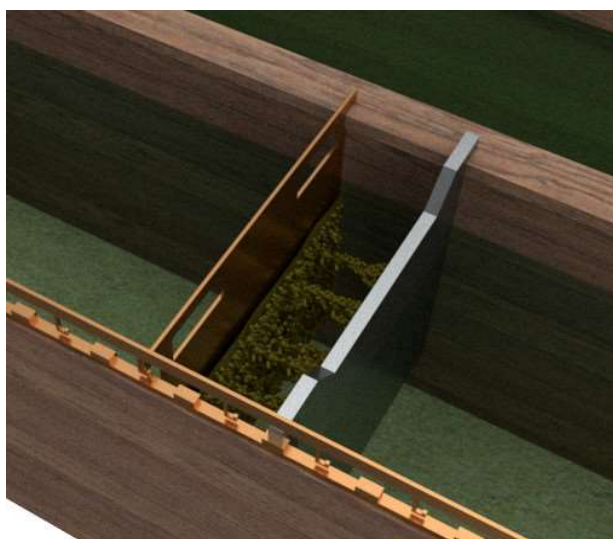


Рисунок 3.4 – 3D-модель дендритов на поверхности электрода без срастания.

Третий механизм: образование дендритного срастания между электродами с замыканием (рисунок 3.5).

Методы контроля: сканирование электролизной ванны тепловизором

Способ устранения (управляющее воздействие): увеличение межэлектродного пространства (МЭП), разрушение вибрацией электродов

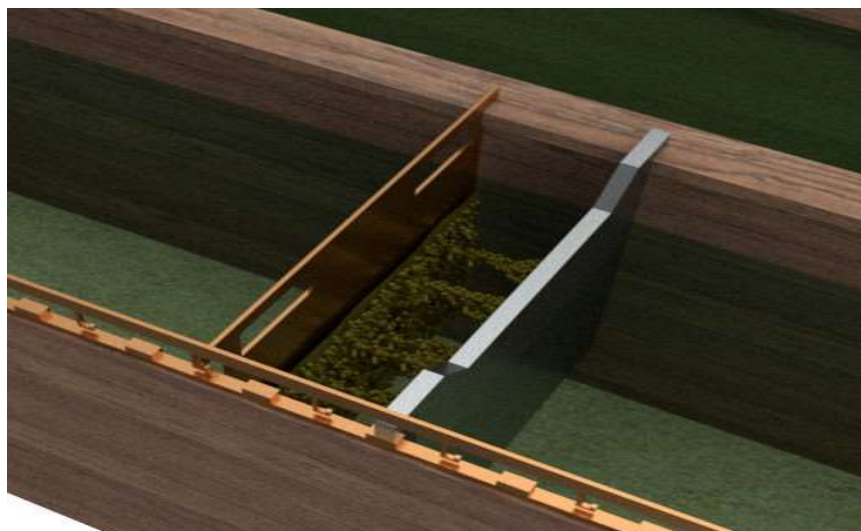


Рисунок 3.5 – 3D-модель дендритов между электродами с коротким замыканием

Как правило, в течении времени образование дендритного осадка на поверхности электрода приводит к короткому замыканию между анодами и катодами. После обнаружения и регистрации замыкания для удаления с них шлама, производят через управляющее воздействие от системы АСУ ТП операцию разрушения и вибрации с последующей обработкой водой или паром. В свою очередь,

нарушение нормального подвода силы тока к электродам приводит к снижению выхода по току на 8-10%.

3D- моделирование различных механизмов показало, что увеличение скорости потока задерживает начало электроконвективной неустойчивости и создает тонкий градиент концентрации. Дополнительные экспериментальные данные с использованием отслеживания частиц во время поперечного потока дополнительно подтвердили, что величина электроконвективных вихрей была снижена до 95-97%.

Пуск электролизера в работу сопровождается с одновременным запуском ПО optris PIX Connect на цифровом двойнике и включается тайминг, для контроля кинетики роста возможного роста дендритов, особенно при снижении межэлектродного расстояния.

После запуска электролизера через 5 часов в электролизной ванне стал появляться anomalно перегретый катод, и на изображении с инфракрасной камеры было обнаружено, что температура этого катода достигла значения, близкого к 60°C (рисунок 3.6). Это явление показывает, что дендриты начали формироваться и прилипать к поверхности катода по 1 механизму.

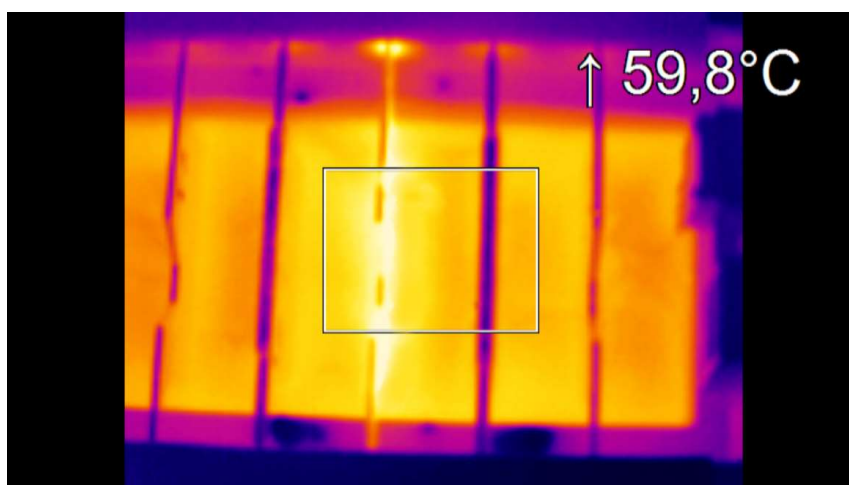


Рисунок 3.6 – Изображение дендритного осадка по всей поверхности электрода

Через 2 часа дендриты на поверхности катода начинают развиваться не вполне неравномерно, и это приводит к локальному образованию дендритного осадка длинных и близких к аноду, и начинается ход 2-го механизма. Температура катода на данной момент составляла почти 90 °С, что можно определить текущим по изображениям цифрового двойника, полученным с тепловой камеры в систему цифрового двойника (рисунок 3.7 и рисунок 3.8)

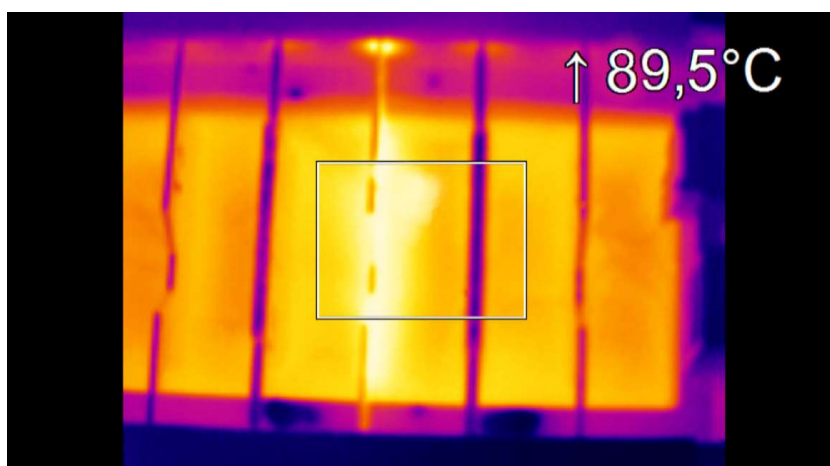


Рисунок 3.7 – Изображение локального образования дендритного осадка на мониторе цифрового двойника

В ходе работы разработан способ обнаружения места дендритного осадка на поверхности электрода при помощи цифрового двойника, включающий сравнение отрицательного отклонения на двух электродах от среднего значения напряжения ванны с пороговой величиной, отличающей тем, что, с целью повышения точности обнаружения коротких замыканий, используют два значения пороговой величины: одно – для электродов, имеющих отрицательные значения отклонений на двух концах, а другое – для имеющих положительный и отрицательный знаки отклонений, причем пороговую величину с отрицательными знаками отклонений напряжений на двух концах выбирают на 20 – 40% ниже пороговой величины для ванн с отрицательным и положительным знаками отклонений.

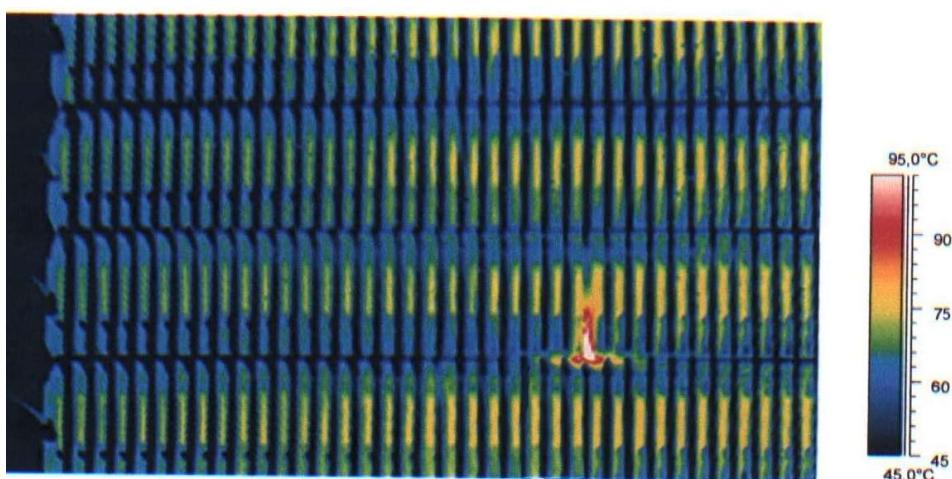


Рисунок 3.8 – Скриншот с экрана цифрового двойника с изображением участков замыканий дендритного осадка между электродами

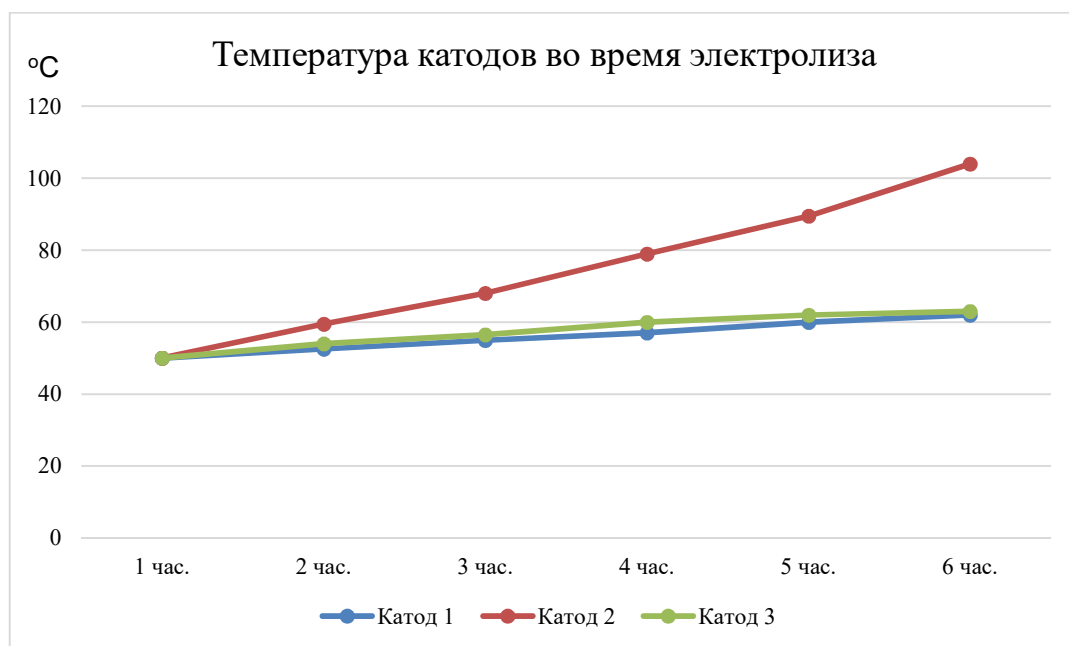


Рисунок 3.9 – Температура катодов во время электролиза

Для предупреждения коротких замыканий был модернизирован узел, регистрирующий диаграммы тока и на основании ее проводящий настройку целевого значения напряжения через цифровой двойник. Такая периодическая настройка электродов обеспечивает равномерное распределение тока между всеми электродами в ванне.

В ходе опытов было установлено, что температура катода 2, на котором появились первые дендритные наросты и налипания достигла температуры более 90 °C (рисунок 3.9).

Состояние электролитических ячеек было отсканировано с помощью ИК-камеры, установленной на мостовом кране. Инфракрасная камера размещается примерно в 5,5 метров от поверхности электродов. Результаты испытаний показаны на рисунке 3.9. На этом тепловом изображении можно обнаружить одну точку короткого замыкания в виде цветных областей. На рисунке 3.10 показано одно из преимуществ электролизеров с ИК-визуализацией, когда одновременно можно измерять несколько электролитических ячеек.

В качестве последнего шага ИК-камера была установлена на кране, и объектив камеры был направлен прямо на ячейки внизу. Расстояние между объективом камеры и поверхностью клеток составляло 4,6м. ИК-камере использовался широкоугольный объектив, поэтому вся ячейка помещалась в область изображения. На примерах изображений можно увидеть 61/61 катода. Цель этого эксперимента состояла в том, чтобы собрать материал для разработки алгоритма обнаружения и убедиться, что ИК-камера может быть установлена на кране

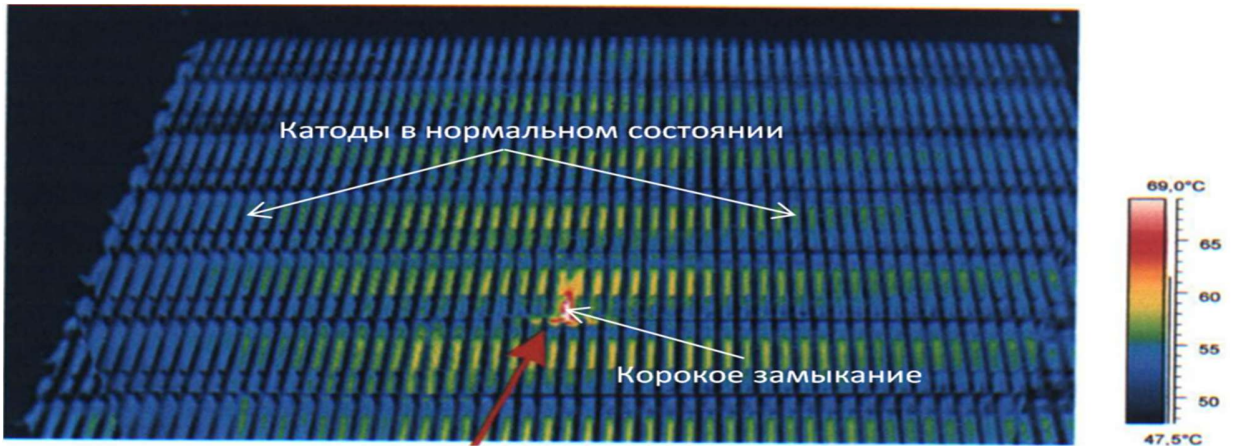


Рисунок 3.10 – Короткое замыкание (красно-белые области) в секции ячеек

Различные скорости крана использовались для определения оптимальной скорости для проверки и для оценки общего времени, необходимого для проверки всех ячеек на заводе. Один из результатов этих испытаний показан на рисунке 3.11.

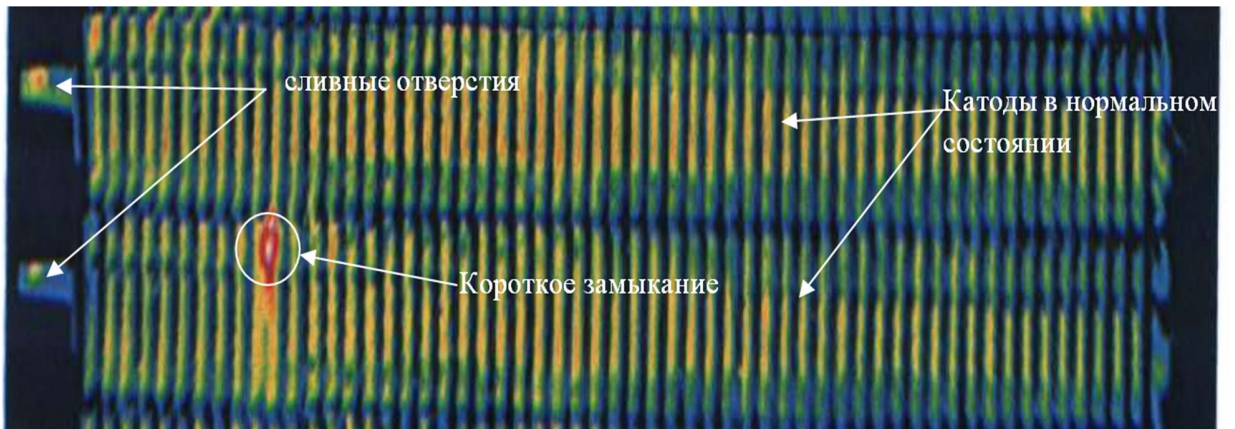


Рисунок 3.11 – Изображение ячейки сканированное с мостового крана

На рисунке 3.11 показаны две ячейки. Они разделены линией распределения тока. Слева расположены сливные отверстия для электролита и осадка. В переливных стоках находится электролит (цветные участки), который гораздо выше по температуре окружающей среды электролита и катодных стержней. По этой причине они видны на изображении. Катоды в нормальном состоянии можно обнаружить в виде черных линий. Видно, что присутствует одно короткое замыкание в середине нижней ячейки в виде красно-белых областей.

Изображения ячеек, выполненные тепловизором, наглядно показывают состояние ячеек и могут быть использованы для обнаружения короткого замыкания и общего состояния ячейки. Интерпретацию изображений можно выполнять и обрабатывать вручную или с помощью

компьютера после сбора информации в базе данных БД. В этом случае можно говорить о создании в системе АСУ ТП цифрового двойника[47,39]. В разделе 3 представлен метод автоматизированной идентификации и интерпретации изображений с использованием обработки сканированных изображений.

3.2 Алгоритм идентификации коротких замыканий

Чтобы автоматизировать процесс обнаружения и фиксации короткого замыкания с помощью тепловизора, изображение ячейки для проверки должно быть захвачено в момент реального времени, причем с самого начала его образования при дендритном срастании. Алгоритм обнаружения и идентификации по информационным признакам требует, чтобы инфракрасное изображение ячейки было зафиксировано при наведении камеры на объект и его контуры выше текущего распределителя (промежуточная шина), когда шина находится между двумя ячейками. Причиной такого захвата изображения, при котором отображаются две ячейки, состоит в том, что это облегчает поиск для создания адекватного алгоритма, и сбор информации о состоянии ячейки гораздо легче идентифицировать по признакам (перегрев катода, повышение температуры электролита, площадь теплового контура при замыкании и т.д.). Ячейка должна быть расположена в поле общего изображения, прежде чем будут обнаружены места коротко-замкнутых катодов для фиксации времени начала и скорости роста площади и температуру электролита. Рисунок 3.13 иллюстрирует пример необходимого времени для захвата изображения в режиме реального времени.

Алгоритм обнаружения включает в себя следующие три основные стадии(рисунок 3.12):

1. Поиск необходимых начальных точек и линий (клетки для ячейки, центральная линия клетки, промежуточная шина)
2. Месторасположение и нумерация катодов на общей матрице ячейки
3. Поиск коротких замкнутых электродов с использованием порогов для последующей идентификации и причин образования замкнутых участков по результатам обработки данных изображения.

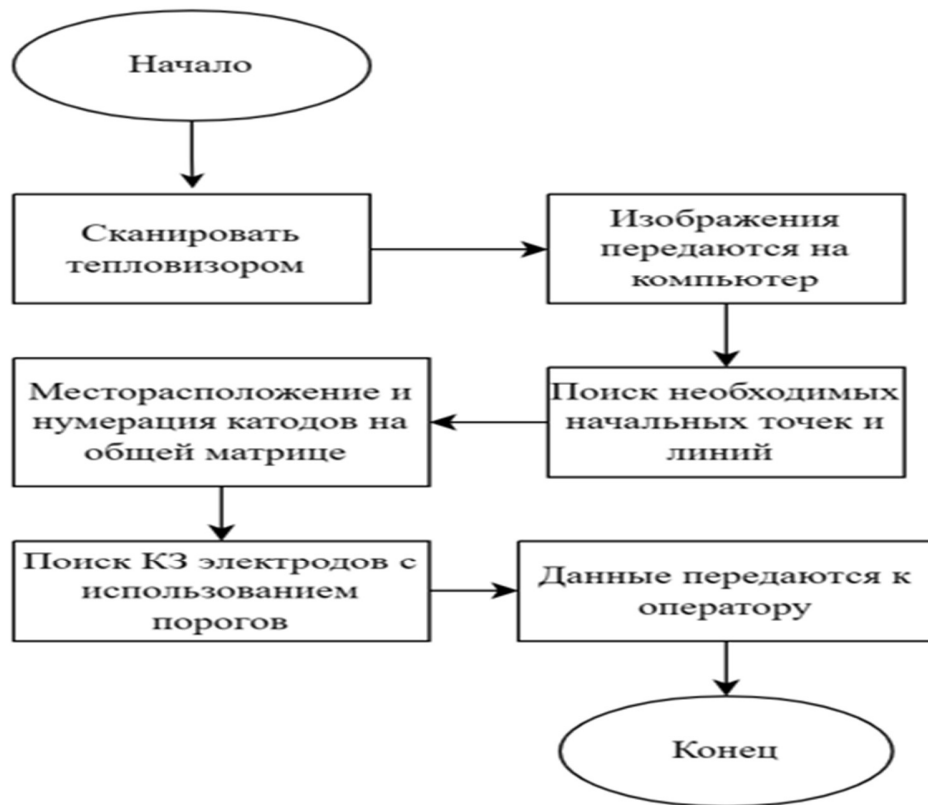


Рисунок 3.12 – Алгоритм обнаружения[5,3]

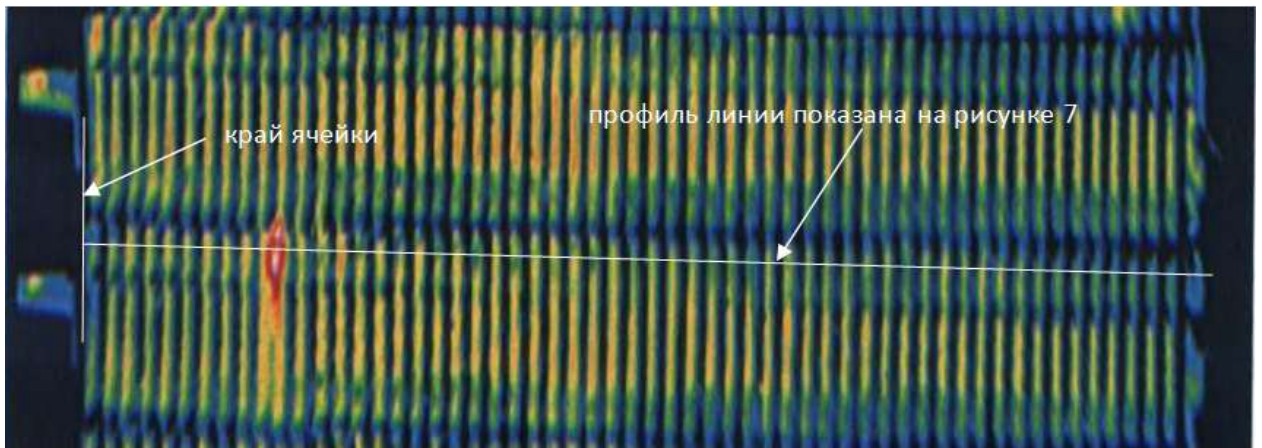


Рисунок 3.13 – Изображение ячейки захвачено в режиме реального времени

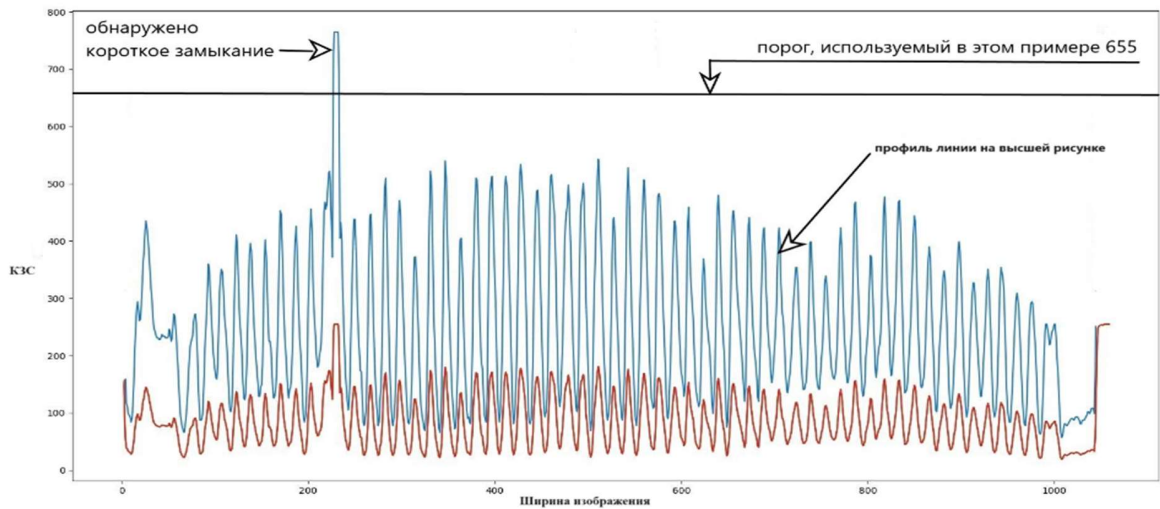


Рисунок 3.14 – Значения шкалы излучения и изменения цвета для профиля линии 6 во времени

Прежде чем будет обнаружена какая-либо точка и площадь короткого замыкания, необходимо определить положение ячейки на изображении[46,5]. Алгоритм, использует геометрию ячейки для определения осевой линии ячейки. После того, как центральная линия ячейки будет позиционирована, текущая полоса распределения может быть позиционирована далее с использованием верхней и нижней осевых линий ячейки. После фиксации текущего распределительного стержня определяется, что ячейка на тепловом изображении имеет вертикальную ориентацию. Чтобы расположить ячейку в горизонтальной ориентации, алгоритм пытается найти край ячейки для последующей идентификации. После того, как ячейка найдена на изображении, определяется положение катодов. При этом катоды нумеруются, начиная с конца ячейки, где расположен слив для перелива электролита. Поиск короткозамкнутых катодов осуществляется с помощью последовательных стадий. Пример значений шкалы света для линии, отмеченной красно-белым цветом, показан на рисунке 3.14.

Алгоритм обнаружения КЗ был протестирован с различными типами тепловизионных изображений ячеек (ИК-характеристик) на имитационном лабораторном стенде с последующей адаптацией в реальных условиях электролитического производства катодной меди. На рисунке 3.15 показан результат, где светлыми линиями, обозначаются целевые значения информационного потока, обнаруженные алгоритмом идентификации. В данном случае короткозамкнутые катодные участки имеют номера 11.

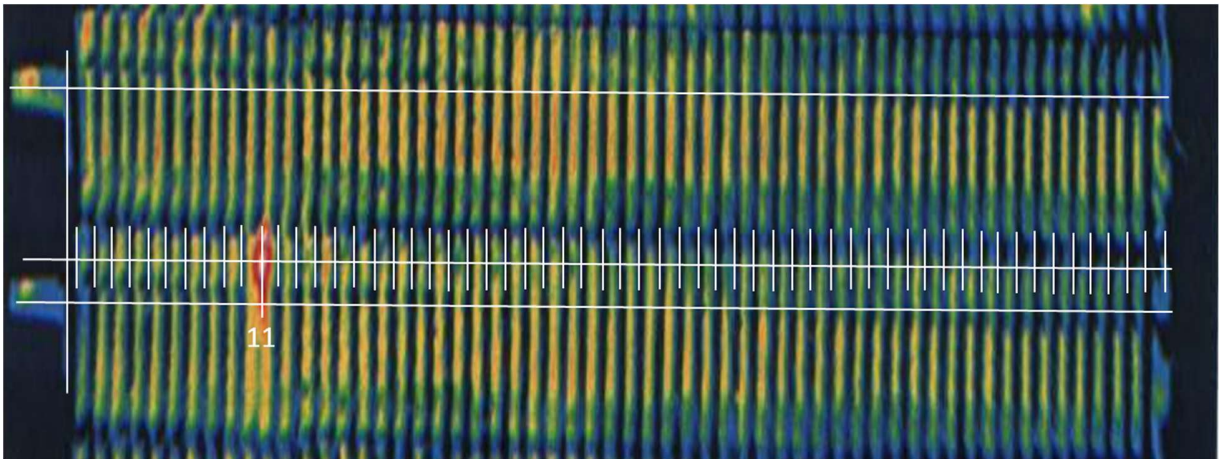


Рисунок 3.15 – Проверка ячейки с использованием алгоритма обнаружения и идентификации короткого замыкания

На многих электролизных установках элементы, как правило, покрыты пластиковым покрытием для удержания тепла, что затрудняет использование ИК-изображения для осмотра элементов. Обычно в этом случае расположение ячейки может быть выполнено успешно, но для поиска и нумерации короткозамкнутых катодов необходимо использовать расположение катодов по умолчанию. Пример изображения клетки, покрытой покрытием, доказывает, что алгоритм обнаружения и идентификации успешно определил местоположение клетки и ее характеристики. В зоне перегрева температура поверхности электрода составила $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, а электролит в зоне максимального нагрева достиг температуры $92\text{ }^{\circ}\text{C}$ [61]. Площадь замыкания составила $14\text{-}18\text{ см}^2$ (2,2% от всей контролируемой поверхности, которая увеличивалась со скоростью $2,4\text{ см}^2$ в минуту. Полученные данные переносятся в БД на третий уровень системы АСУ ТП, для принятия решения о мгновенном разрушении срастания между электродами[101,19,44,13]. В данном случае, в комплексе с тепловизором созданный объект контроля и идентификации состояния электролизной ячейки работает как цифровой двойник, включая функции прогноза дальней технологической ситуации по полученным ранее данным.

В итоге, через бланкет можно обнаружить любые короткозамкнутые катоды и зафиксировать начало отклонения и скорость роста площади, а в нормальном состоянии - нет. Расположение катодов по умолчанию используется для определения количества короткозамкнутых катодов, и дает адекватный результат и для приведенных данных по измерению температуры электролита и площади самого замыкания.

3.3 Создание программы для ЭВМ «Программа цифрового автоматизированного контроля процесса электролитического рафинирования меди»

После проведения экспериментов в лабораторных условиях, а также в условиях промышленного производства катодной меди, было установлено, что можно использовать тепловизоры для предварительного определения мест, где может возникнуть короткое замыкание. Это позволяет заранее предупредить оператора, что предотвратит потенциальные аварии и обеспечивает безопасность в процессе производства[57,58].

Программа разработана для мониторинга и контроля основных технических параметров процесса электролизера катодной меди, чтобы обеспечить его эффективность и стабильность, а также оптимизировать качество конечного продукта[3,42].

Основные функции программы(рисунок 3.16) :

1. Мониторинг технических параметров:

Отображение таких параметров, как температура электролита, напряжение между двумя точками электролизной ванны, высота осадка, высота уровня электролита и концентрация раствора H_2SO_4 в реальном времени.

Оповещение при превышении параметрами безопасных или оптимальных значений.

2. Управление процессом:

Ввод исходные данные параметров: напряжения, концентрации раствора H_2SO_4 и других параметров для обеспечения оптимальных условий электролиза;

Мониторинг параметров: Основной интерфейс будет отображать текущие технические параметры процесса электролиза, включая: Температуру электролита; напряжение между двумя точками электролизной ванны; высоту осадка; высоту уровня электролита; концентрацию раствора H_2SO_4 ;

Регулировка параметров: Используйте кнопки и ползунки для регулировки параметров в соответствии с потребностями.

3. Сохранение данных:

Запись параметров в течение времени для анализа и оптимизации процесса;

Экспорт данных в виде отчетов или графиков.

4. График температуры по времени:

Построение графика, отображающего температуру электролита в течение времени, что позволяет пользователю легко отслеживать изменения температуры.

5. Дружественный интерфейс пользователя:

Графический интерфейс, четко отображающий параметры и состояние системы.

Простые в использовании кнопки и настройки.

6. Язык программирования:

Программа написана на языке Python с использованием библиотек, таких как Tkinter для графического интерфейса, Pandas для обработки данных и Matplotlib для построения графиков.

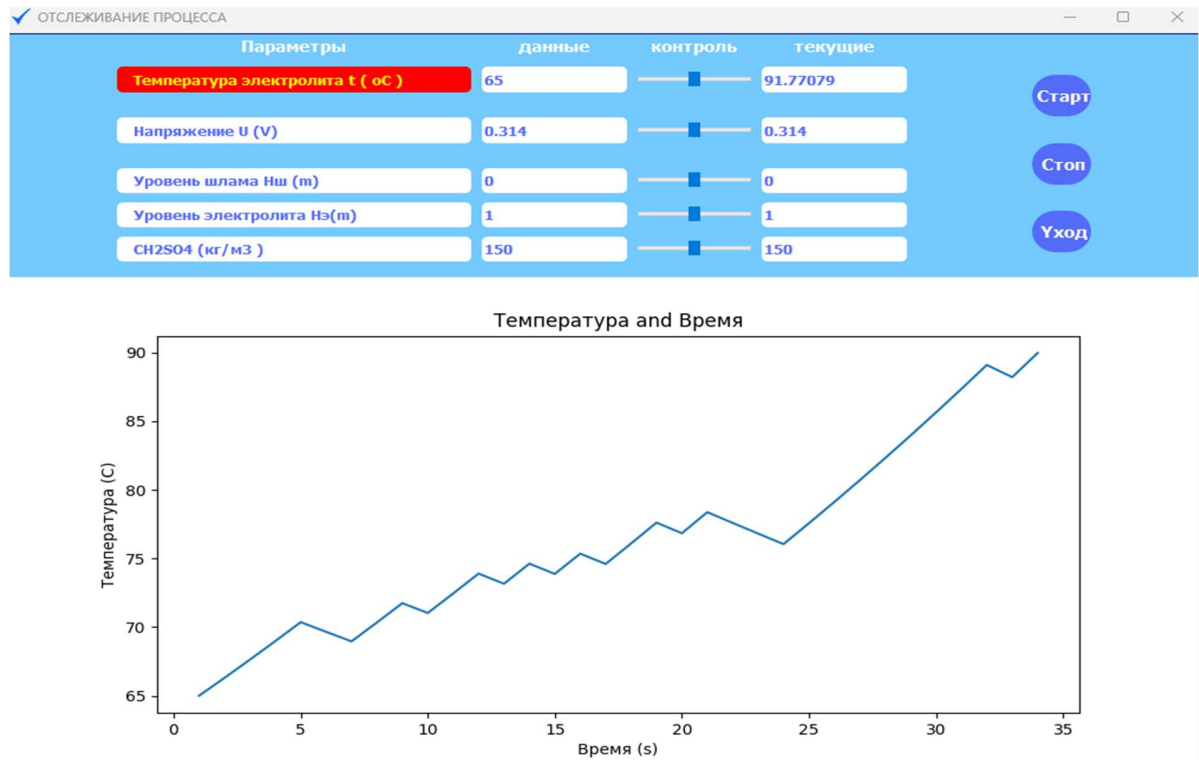


Рисунок 3.16 – Программа мониторинга и контроля основных технических параметров процесса электролизера катодной меди.

В случае возникновения необычно высокой температуры электролита, программа автоматически генерирует уведомление на экране, предназначенное для оператора. Данное уведомление информирует об необходимости инициировать процедуру сканирования и проверки температуры электродов с применением тепловизионной камеры(рисунок 3.17).

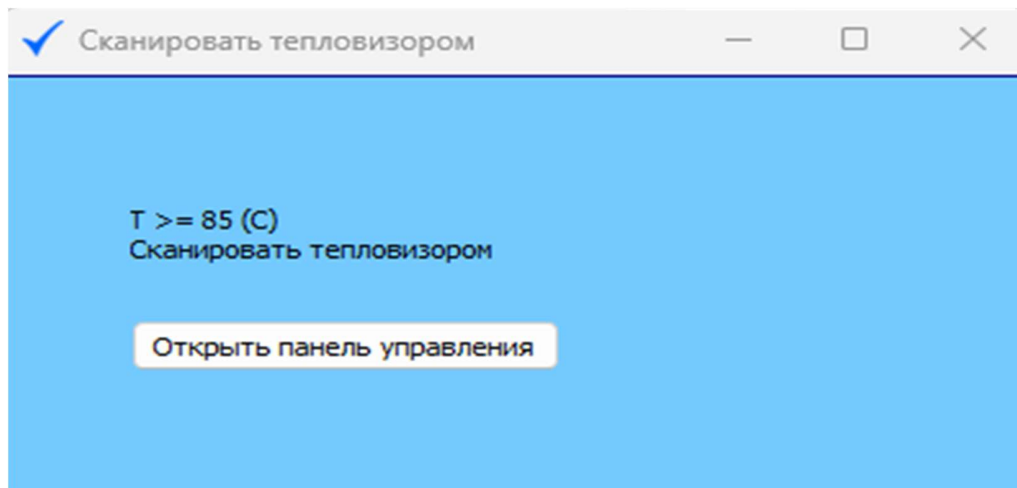


Рисунок 3.17 – Окно сообщает о начале сканирования с тепловизионной камеры..

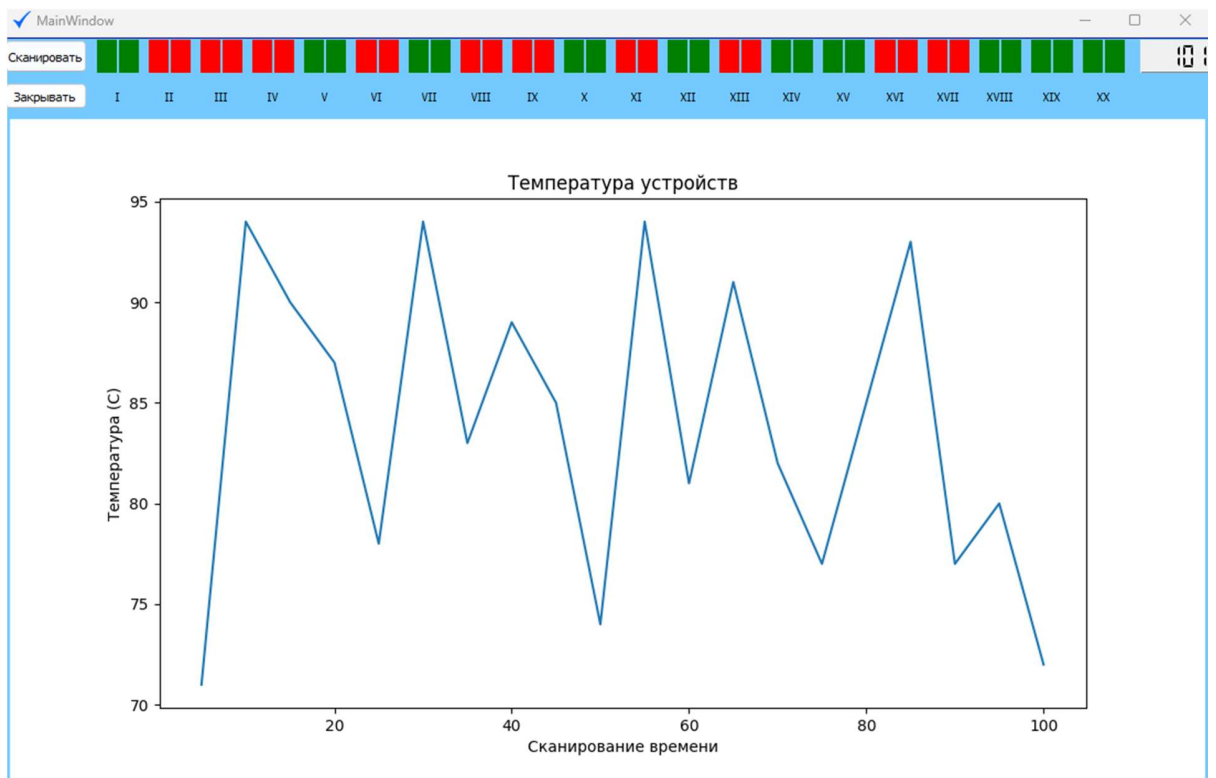


Рисунок 3.18 – Процесс сканирования тепловизором каждой ванны.

Получив уведомление, оператор инициирует процесс сканирования, осуществляя нажатие на специальную кнопку, представленную на окне информационного сообщения. Тепловизионная камера размещена над поверхностью электролизных ванн и с помощью механизма движения, сканирование начинается с начала (пары анод-катод I) и продвигается до конца (пары анод-катод XX) каждой ванны. Этот процесс повторяется до завершения сканирования всех ванн в электролизном цехе(рисунок 3.18).

Этот процесс полностью отображается на экране оператора, включая местоположение короткого замыкания, температуру каждой пары электродов и время сканирования тепловой камерой в каждой электролизной ванне.

После завершения сканирования каждой ванны, результаты отображаются на экране управления и сохраняются в базе данных для последующего анализа (рисунок 3.19). Данные используются для определения места отложений на электродах для их очистки, предотвращения коротких замыканий или заменить электроды, поврежденные КЗ.

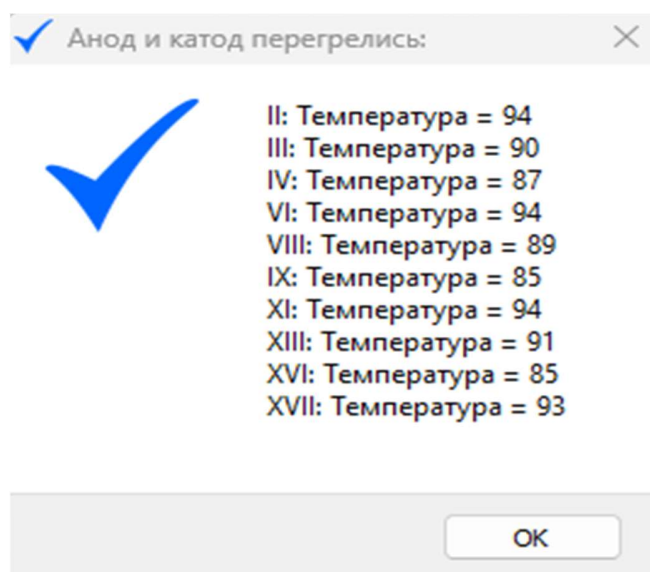


Рисунок 3.19 – Результаты сканирования тепловизором каждой ванны.

Особенности программы:

Высокая степень автоматизации: Программа способна автоматически регулировать и поддерживать технические параметры на оптимальном уровне.

Подробные отчеты: Программа предоставляет инструменты для анализа и отчетности, помогая пользователям легко отслеживать и улучшать процесс.

Наглядные графики: График температуры по времени позволяет пользователям легко отслеживать и контролировать температуру электролита.

Дружественный интерфейс: Интуитивно понятный дизайн интерфейса, легко использовать даже тем, у кого нет большого опыта в технике.

Выводы к главе 3

Разработанная система контроля позволяет определить участки коротких замыканий между электродами и при помощи сканирующего цифрового тепловизора идентифицировать по признакам отклонение технологических параметров электролитической ячейки. Разработанная имитационная

установка в виде цифрового двойника является превосходным методом прогнозирования и контроля коротких замыканий, использование которой более эффективно, чем применение ручных методов с термокраской на настоящее время.

В рамках проведения испытаний получены кинетические зависимости роста площади и объема короткого замыкания между электродами, данные скорости роста температуры поверхности электрода и температуры электролита, ИК характеристики на различных стадиях процесса поле замыкания электродов для идентификации параметров.

Полученные результаты на лабораторном стенде позволяют получить зависимости для обеспечения последующего управляющего воздействия в рамках автоматизированной системы управления электролизной серии и устойчивого энергетического режима при минимизации удельного расхода электрической энергии на 1 т катодной меди.

Данная работа выполнена на оборудовании Центра переработки техногенного минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета в рамках научного направления «Энергосберегающие технологии».

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ЦИФРОВОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ

4.1 Создание виртуальной модели электролизера для определения влияния осадка на дне ванны на качество меди

Создание виртуальной модели электролизера для определения влияния шламового осадка на качество самой 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 4.1,4.3).

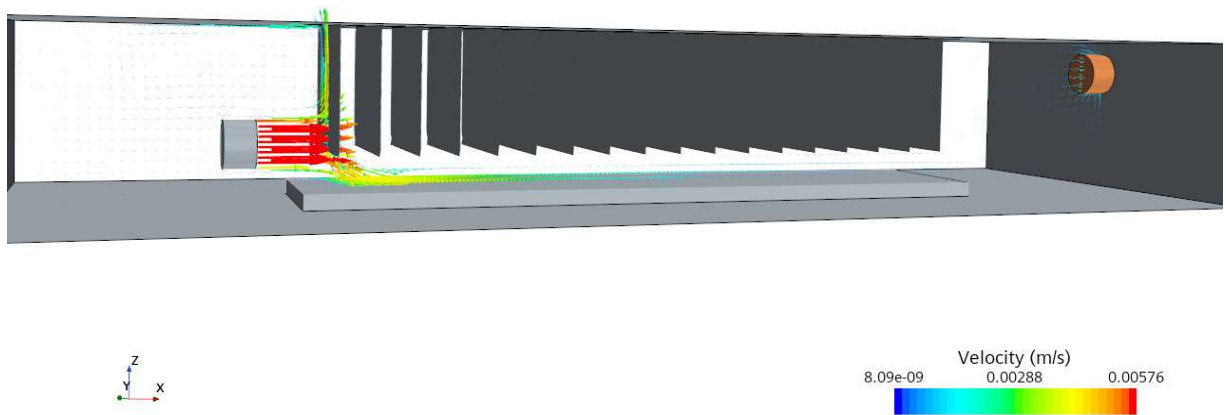


Рисунок 4.1 – Виртуальной модели электролизера при отсутствии осадка.

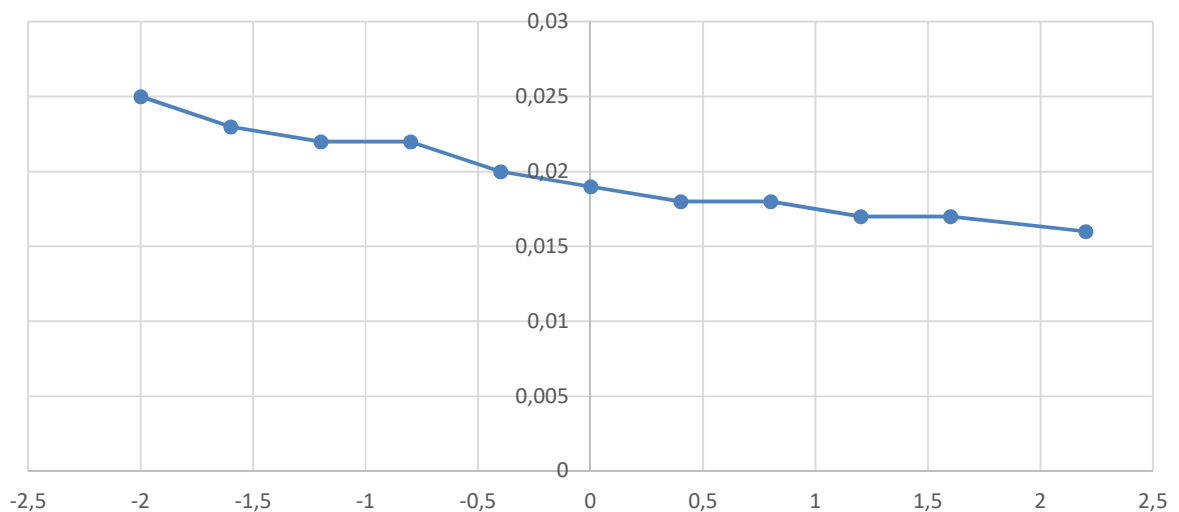


Рисунок 4.2 – Скорость электролита в сечениях при отсутствии осадка

При отсутствии осадка на дне электролизной ванны процесс электролиза продолжается нормально, и скорость движения электролита по поверхности электродов остается стабильной, без заметных отклонений (рисунки 4.2).

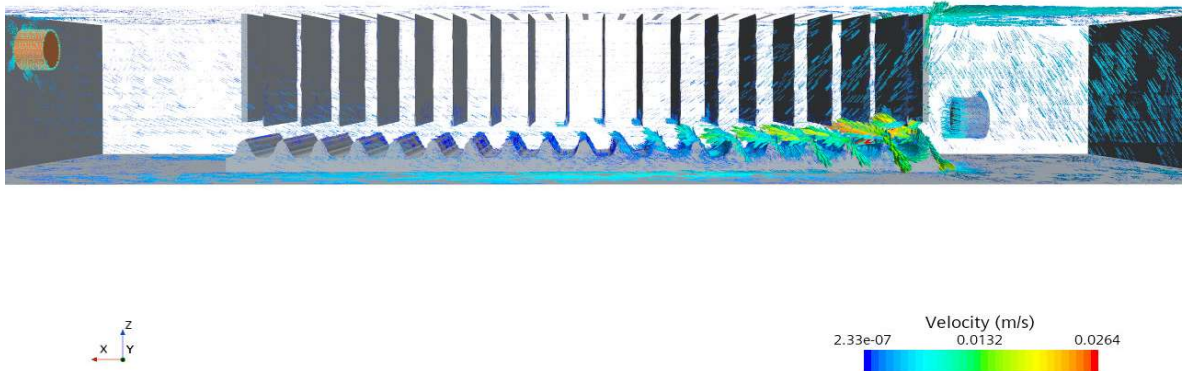


Рисунок 4.3 – Виртуальной модели электролизера при присутствии осадка

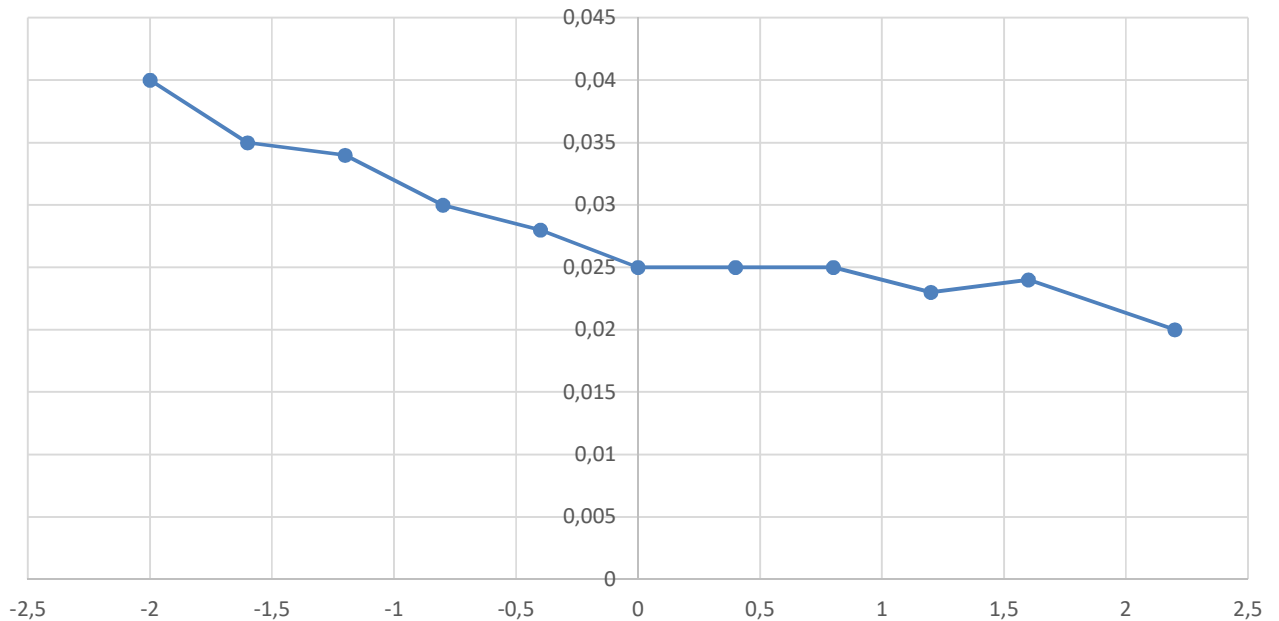


Рисунок 4.4 – Скорость электролита в сечениях при присутствии осадка

Когда накопление осадка на дне ванны становится значительным, а их высота значительно возрастает, процесс электролиза начинает переживать неравномерное перемешивание в различных местах. Скорость движения электролита через области электродов увеличивается, что приводит к ускоренному перемещению заряженных частиц и образованию острых выступов, или "хвостовых

шипов", в нижней части электродов, что может привести к возникновению коротких замыканий (рисунки 4.4).

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

Для обеспечения стабильного процесса электролиза во ванне необходимо учитывать регулирование концентрации и температуры входного электролита, а также контролировать возможные короткие замыкания, которые могут возникать в процессе работы.

Применение данной цифровой системы позволяет достичь более высокой точности и технологичности контроля параметров сырья в процессе электролиза, что обеспечивает оперативное предоставление наиболее точных и быстрых данных для прогнозирования технологической ситуации. Эта система, с постоянным обновлением информации, предоставляет сигналы управления и оптимальные решения для достижения максимальной эффективности и результативности процесса.

Использование современных автоматизированных систем управления в производстве катодной меди обеспечивает возможность удаленного доступа к ресурсам для контроля и регулирования параметрами электролитического процесса, что определяет показатели эффективности производства при снижении энергетических затрат. Важными параметрами в электролитическом рафинировании меди являются температура и состав электролита, скорость циркуляции электролита, уровень шлама, частота замыканий между электродами и плотность тока, которые напрямую влияют на количество и объем катодного осадка. Наличие коротких замыканий на ванне обуславливается ростом дендритов, что влечет за собой необходимость контролировать напряжение, состав и температуру электролита, и периодически анализировать состав и накопление объема шламового осадка на дне электролизера. Интенсификация процесса электролиза происходит в основном за счет повышения плотности тока, снижения межэлектродного расстояния, улучшения качества электродов, совершенствования системы циркуляции электролита при дальнейшей механизации и автоматизации самого процесса и его вспомогательных операций, ведущих к повышению производительности. Целью данной работы является расширение функций АСУ ТП за счет внедрения датчиков контроля уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь при наличии замыканий дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера с использованием нового программного обеспечения. Рассмотрен способ контроля уровня шламового осадка для предотвращения коротких замыканий, и разработана программа контроля при помощи

датчиков уровня поплавкового типа. Данное мероприятие при внедрении позволит снизить расход электроэнергии на 15-20 %, что может быть полезным для внедрения в цехах электролитического производства меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г.Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

Повышение эффективности работы энергоемких металлургических производств является первостепенной задачей для дальнейшего развития устойчивой работы минерально-сырьевого комплекса. С другой стороны, излишнее увлечение новыми приемами цифровой трансформации может только усложнить поставленные задачи по энергетической эффективности крупнотоннажных производств[88-91].

Анализ существующих систем контроля и управления, применяемых на предприятиях по производству катодной меди указывает на недостаточность количества регулируемых параметров для устойчивой работы электролизеров[100,92]. Для этого необходим ввод новых функциональных точек контроля с дополнительными датчиками для более эффективного управления производственным процессом. Это, в некоторой степени, относится и к действующим производствам по получению катодной меди, например, для электролитических производств меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г.Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам).

В рамках выполняемой работы необходимо решить задачи по расширению функциональных свойств систем АСУ ТП, и внести соответствующие корректировки в блоки Базы Данных на основе полученных математических моделей, для управления и оптимизации процессов, связанных с образованием шламового осадка в нижней части электролитической ячейки. В данном случае необходимо установить блок согласования показателей датчика температуры, контроллера уровня электролита и поплавкового регулятора с учетом их взаимного влияния при сопоставлении полученных данных со стандартными параметрами для выявления аномалий во время хода процесса. Данное решение направлено на настройку дополнительных устройств в рамках существующей параметризации для достижения оптимальных условий процесса. В частности, для этого функция раннего обнаружения короткого замыкания электродов из-за различного типа нарушений нужна для своевременного предупреждения оператора об отклонении, и для более быстрой обработки данных для последующего управляющего воздействия, направленного на разрушение и ликвидацию локальных мест срастания дендритов с учетом их объема и количества в нижней части ванны. Во время увеличения уровня осадка за счет попадания частиц шлама в межэлектродное расстояние происходит изменение концентрации электролита.

Таким образом, в данной работе необходимо решить вопросы расширения функций автоматизированной системы управления (АСУ ТП) за счет установки датчиков контроля уровня

осадка для снижения безвозвратных потерь для снижения количества замыканий дендритного осадка на электродах в нижней донной части электролизера, и установки дополнительного датчика контроля состава электролита.

Регулируемые технологические параметры электролитического рафинирования меди

Электролитическое получение меди является физико-химическим процессом, протекающим при большом массиве регулируемых параметров, влияющих на ход технологического процесса, и характеризуется существенным количеством скрытых параметров, влияющих на протекание электрохимических процессов при существующих проблемах с адекватной идентификацией различных стадий процесса[24,48,33]. К основным входным параметрам этого процесса относят, в первую очередь, содержание в электролите ионов меди, концентрацию серной кислоты и их соответствие выходным параметрам, которые определяют производительность и выход по току. Таким образом, эффективность электролитического рафинирования меди во многом зависит от состояния электролизеров (ванн) относительно шламообразований в верхней и нижней части электродов. Если дендритные замыкания в верхней части ячейки можно увидеть и зарегистрировать через тепловизионную камеру, то отложения на электродах в нижней части ванны представляют своеобразный «черный ящик».

В ходе технологического процесса необходим контроль и анализ текущих изменений во всем объеме электролитической ячейки следующих параметров[41,93,81], и это необходимо делать с учетом дополнительных условий контроля в стандартной системе АСУ ТП:

- 1) Химический анализ содержания меди в электролите и серной кислоты;
- 2) Текущая температура электролита;
- 3) Скорость циркуляции электролита;
- 4) Сила тока на серии;
- 5) Плотность тока на электродах;
- 6) Напряжение электролизной ячейки;
- 7) Уровень шлама при контроле через поплавковый погружной датчик;
- 8) Концентрация хлорид-иона в электролите;
- 9) Давление и расход пара;
- 10) Передача и транспортирование части рабочего электролита на слив;
- 11) Смешивание электролита после нескольких периодов циркуляций через расходные и запасные баки;
- 12) Непрерывное расчетное дозирование добавок серной кислоты и сульфата меди в через дозаторы;

13) Разбавление и изменение концентрации электролита отработанной промывной водой и конденсатом при вводе в электролит серной кислоты;

14) Катодная плотность тока;

15) Загрузка и установка анодов через заданный период, и время их растворения в результате электролиза.

С учетом этого, необходим анализ и взаимосвязи между всеми рабочими параметрами, который указывает на необходимость уточнения и ввода дополнительных данных, таких как содержание ионов меди, уровень электролита и 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 осадка на электродах и шлама на дне ванны с количеством и объемом дендритных нарастаний и замыканий на электродах, особенно после их разрушений, что приводит к изменению концентрации. В известных работах [72,66,102], предлагается множество способов определения значений входных параметров для устойчивого управления процессом электролиза, но в основном на базе текущих данных (Базы Данных - БД), существующих на предприятиях.

В ходе работы были получены математические модели при различных сценариях процесса во время образования осадка на дне электролизной ячейки на различных стадиях процесса [59].

1-ый сценарий. Образование налипания в нижней части электродов

Этот механизм связан с частичным попаданием частиц осадка на нижнюю часть поверхности электродов при неконтролируемой высоте осадка при разрушении дендритного срастания в верхней части катода. «Взмучивание» электролита приводит к изменению его содержания, особенно в нижней части ванны.

2-ой сценарий. Подъем верхних слоев осадка к поверхности анодов и катодов с образованием срастаний между электродами. Причина - высокая турбулентность электролита и самого шламового осадка

3-ий сценарий. Полное замыкание между электродами при касании шламового осадка с нижними частями. Причина заключается в том, что не контролируется высота слоя шламового осадка в электролизной ячейке и не учитывается амплитуда движения электролита и шлама.

Как правило, по статистическим даны на предприятии по производству катодной меди электролитическим способом за 24 часа происходит до 15-20 случаев по различным сценариям, но

наиболее часто наблюдается 1 сценарий (до 10 случаев в сутки). На рисунках 4.5-4.7 представлены модели для всех трех сценариев

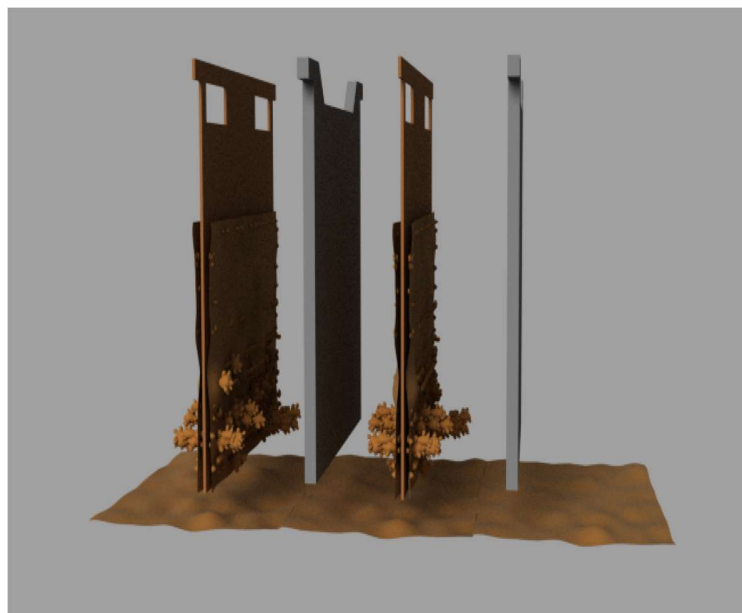


Рисунок 4.5 – Модель образования и изменения уровня шламowego осадка при средней турбулентности электролита

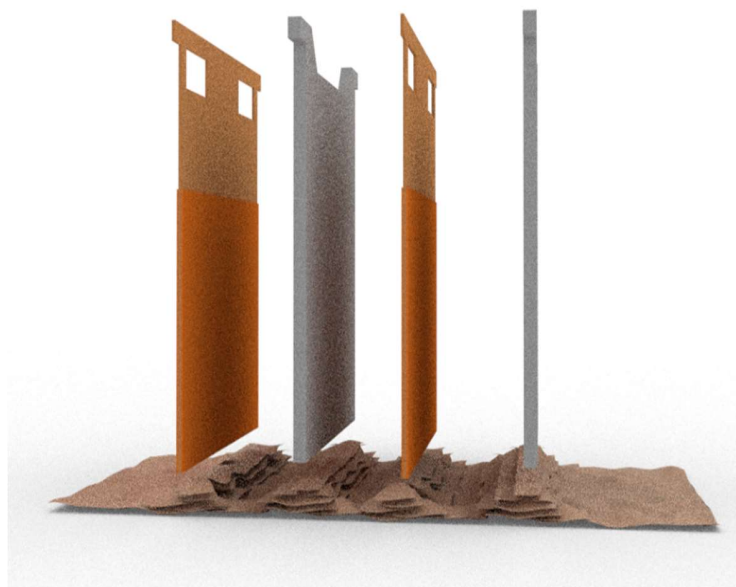


Рисунок 4.6 – Модель образования и изменения уровня шлама при высокой турбулентности электролита



Рисунок 4.7 – Модель полного замыкания электродов при касании осадка нижней части электродов

Параметрический анализ процесса электролиза помогает определить взаимосвязь между входными данными процесса электролиза – БД (межэлектродное расстояние, сила тока, плотность тока, сопротивление электролита с учетом концентрации ионов меди, и их влиянием на выходные параметры электролитического рафинирования (выход по току, производительность). Но при этом, необходим учет и контроль дополнительных параметров, например, таких как уровень шлама на дне ванны и показатель pH[106].

В этой связи, при построении математической модели использовался параметрический анализ процесса электролитического рафинирования (процесс 1.1 и 1.2, процесс 2, рисунок 4.8), в частности[109-101], как вспомогательный прием для вычисления и анализа управляющих воздействий при возникающей производственной ситуации (по сценариям), в соответствии с полученной блок-схемой.

Для блок-схемы и расчетной математической модели процесса были приняты следующие обозначения: входные параметры по составу электролита: $C_{H_2SO_4}$ - содержание серной кислоты $H_2SO_4 = 150$ г/л; C_{CuSO_4} - содержание сульфата меди $CuSO_4 = 279.78$ г/л; C_{Cu} - содержание меди в электролите $Cu = 50$ г/л; При заданном составе электролита получены: η_{Cu}^* - значения выхода по току $\eta_{Cu}^* = 96\%$; Pr_{Cu}^* - производительности $Pr_{Cu}^* = 50$ т/сут.

d_{Pr} , d_{Cu} – производительность процесса и выход по току, соответственно параметры электролизного процесса 1.1 и 1.2, которые отличаются по значению;

В данном случае, управляющие воздействия - плотность тока D и скорость циркуляции V .

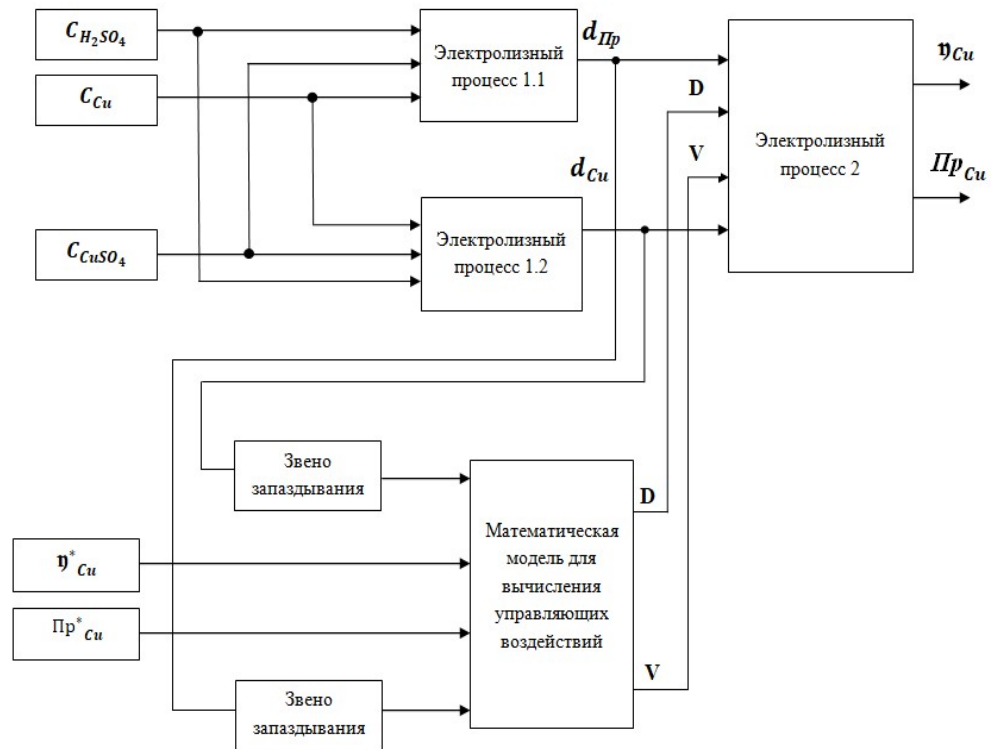


Рисунок 4.8 – Блок-схема математической модели параметрического анализа электролитического производства катодной меди.

Известна разработка математической модели процесса электролитического рафинирования меди Гронь Д.Н.[11,12], в рамках которой получены многопараметрические математические модели с использованием множественного регрессионного анализа. Для корректировки АСУ ТП и контроля осадка с учетом текущего значения выхода по току можно применить уравнение (1), а для производительности уравнение (2):

$$\eta_{Cu} = 885,52052 + 0,01869 * V + 0,01048 * D^2 - 5,79232 * D + 1,43 * 10^{-4} * (C_{H_2SO_4})^2 - 0,01231 * C_{H_2SO_4} + 0,09 * 10^{-5} * (C_{Cu})^2 - 4,98 * 10^{-3} * C_{Cu} + 3,5 * 10^{-4} * (C_{CuSO_4})^2 - 0,07688 * C_{CuSO_4} \quad (1)$$

$$Pr_{Cu} = -122,6664 + 0,0145 * V - 2,4 * 10^{-3} * D^2 + 1,30096 * D + 3,6 * 10^{-4} * (C_{H_2SO_4})^2 - 0,09653 * C_{H_2SO_4} + 4,4 * 10^{-5} * (C_{Cu})^2 - 2,7 * 10^{-3} * C_{Cu} + 2,1 * 10^{-4} * (C_{CuSO_4})^2 - 0,0436 * C_{CuSO_4} \quad (2)$$

Тогда, дополнительное параметрирование отражает истинное значение выхода по току и производительности, с учетом обнаруженных отклонений при последующей корректировке технологического режима через управляющее воздействие, что поясняется соответствующей блок-схемой (рис. 4). Она основана на математической модели процесса электролитического рафинирования и модели функциональных связей текущих значений управляющих величин

плотности тока D , скорости циркуляции V на основе сравнения значений производительности Pr_{Cu} и выхода по току η_{Cu} , при согласовании с заданными параметрами по пункту 1.1 и 1.2 с учетом коэффициента запаздывания. В отличие, от существующей модели, внесены корректировки, в соответствии с предполагаемыми тремя механизмами образования шламового осадка и дендритными срастаниями на электродах.

С помощью установленного режима контроля и управления при условиях (1) и (2) на основе выполненной математической модели процесса электролитического рафинирования меди и блок-схемы может быть получена зависимость влияния межэлектродного расстояния на плотность тока и сопротивление (рисунок 4.9).

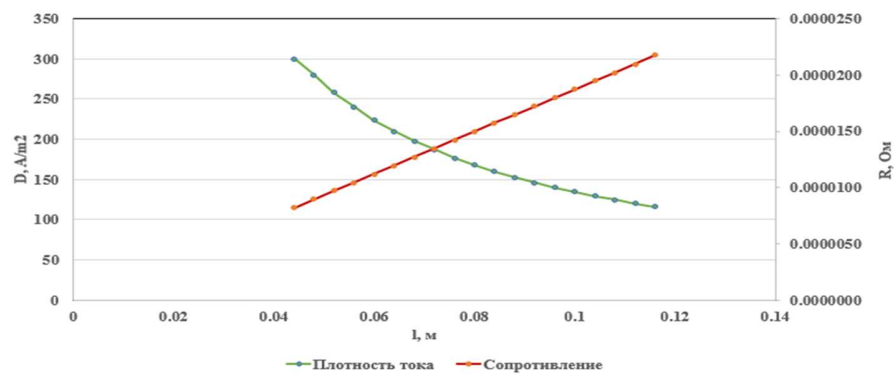


Рисунок 4.9 – Влияние межэлектродного расстояния на плотность тока и сопротивление

Полученная зависимость указывает на то, что диапазон изменения плотности тока D находится в рациональных пределах 250-300 A/m², а межэлектродное расстояние изменяется в пределах 0,045÷0,055 м.

При оценке влияния плотности тока выявлено, что номинальная производительность достигает оптимального значения, и для начала управляющего воздействия D находится в диапазоне 260-280 A/m² (рисунок 4.10).

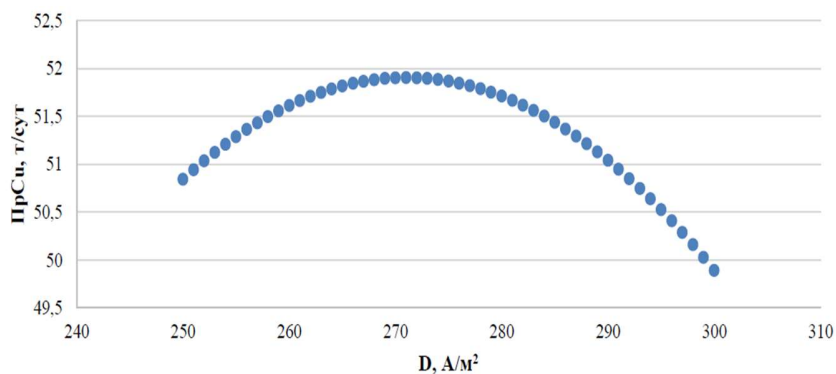


Рисунок 4.10 – Зависимость производительности процесса от плотности тока D

Основываясь на проведенном параметрическом анализе, можно обосновать ввод дополнительных входных параметров процесса электролиза.

Значения содержания ионов меди также является очень важным фактором. По мере роста концентрации Cu^{2+} увеличивается выход по току и снижается напряжение на ванне, когда снижается уровень осадков. Высокая концентрация меди позволяет повысить выход по току. Обычно концентрацию меди поддерживают в пересчете на двухвалентный катион меди на уровне 40-60 г/л.

Необходимо отметить, что содержание H_2SO_4 существенно влияет на выход по току и расход электроэнергии. Как правило, его значение поддерживают в интервале 100-150 г/л.

Рост температуры влияет на увеличение выхода по току, но при снижении напряжения на ванне повышаются значения электропроводности электролита. В диапазоне температур 20-70°C наблюдается общая тенденция увеличения дисперсности; при этом, физические свойства ухудшаются и начинает растворяться катодный осадок. Поэтому, температуру электролита поддерживают на уровне 50-60 °С, а циркуляцию электролита в ваннах проводят для поддержания значений заданной температуры электролита, снижения расслоения электролита из-за различных плотностей растворов CuSO_4 и H_2SO_4 и его составляющих, и стабилизации процесса перемешивания электролита для насыщения прикатодного слоя ионами меди. Из полученных расчетных данных, скорость циркуляции электролита необходимо выдерживать постоянной на уровне 20 л/мин.

4.2 Разработка алгоритма управления процессом электролитического рафинирования меди

При электролитическом рафинировании контролируется масса анодов и катодов, анодных остатков, катодного скрапа, исходных катодов, применяемых реагентов, вычисляется объем выводимого из циркуляции электролита и вводимых объемов серной кислоты, определяется уровень в баковой аппаратуре и т.д.[75,77]. Наибольшее значение имеет контроль за составом и температурой электролита, а также процесс обнаружения коротких замыканий между анодами и катодами, при расчетных значениях скорости циркуляции электролита, при дополнительном контроле содержания электролита и уровня шлама на дне ванны.

Для контроля содержания меди и кислоты в электролите применяются малогабаритные анализаторы (типа МАК-1 и МАК-2). Для определения расхода пара, воды, электролита применяют дифманометры с регистраторами, а температуру измеряют термометрами сопротивления. Применение датчиков температуры с дистанционным управлением позволило полностью автоматизировать регулирование температуры электролита.

Для обнаружения и устранения коротких замыканий, приводящих к нарушениям нормального подвода тока к электроду и снижают значение выхода по току, применяют различные

методы. Находят применение гауссметры, термочувствительные краски, инфракрасные датчики. Представляет интерес для внедрения способ обнаружения коротких замыканий с помощью установленного на мостовом кране, обслуживающем электролизные ванны, камеры с датчиком инфракрасного излучения(тепловизор). Трудозатраты на контроль за короткими замыканиями с использованием современных методов сокращаются до 30% от трудозатрат при традиционных системах контроля. Выход по току повышается на 2%.

На основании вышеперечисленных факторов создана программа для ЭВМ, позволяющая более эффективно контролировать технологические характеристики электролиза меди. Алгоритм работы программы показан на рисунок 4.11.

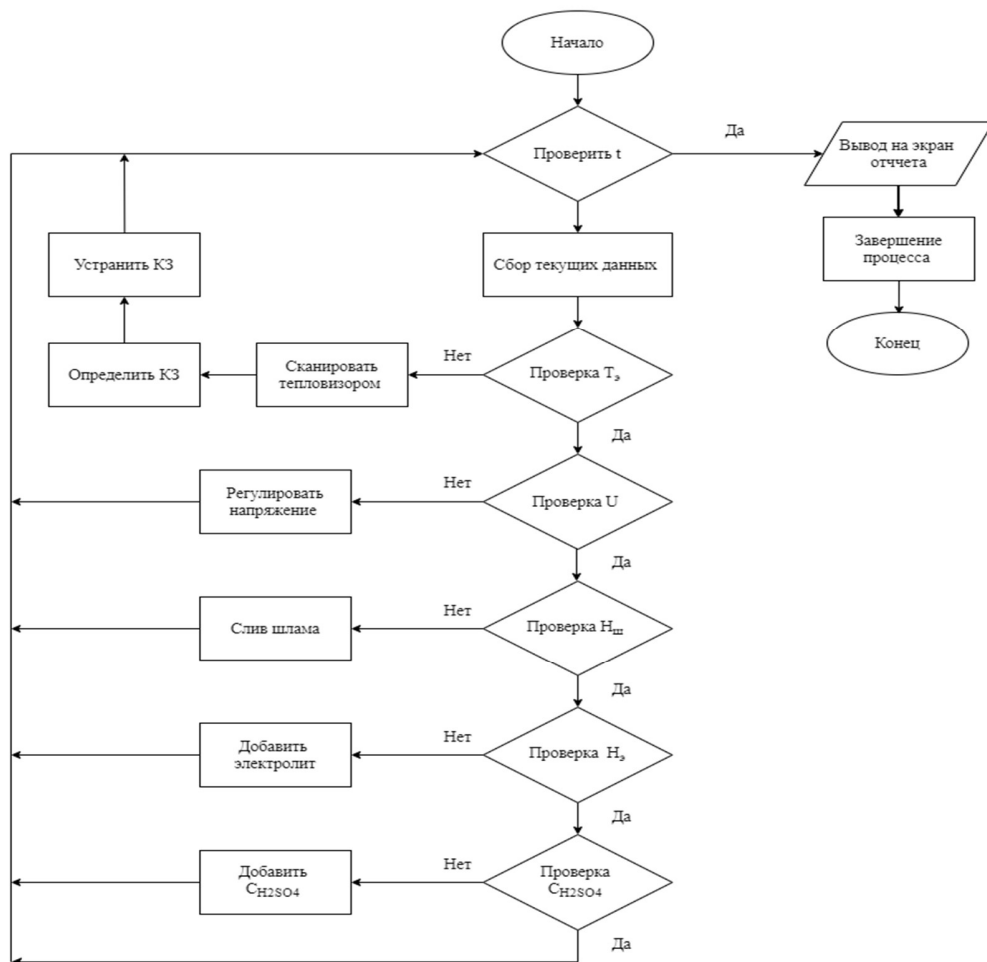


Рисунок 4.11 – Блок-схема алгоритма работы программы ЭВМ

На блок-схеме приняты следующие обозначения

1. Начало процесса (ввод параметров в Базу Данных)

2. Проверка длительности процесса τ (мин.), и окончательный тайминг (при достижении 48 часов процесс считается завершенным)
3. Сбор текущих данных от датчиков:
 - Температура электролита t ($^{\circ}\text{C}$)
 - Напряжение U (V)
 - Уровень шлама $H_{\text{ш}}$ (m)
 - Уровень электролита H_3 (m)
 - Концентрация серной кислоты в электролите $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$)
4. Проверка параметра температуры электролита в допустимых пределах $t_b < 85^{\circ}\text{C}$
5. Проверка параметра напряжения между электродами при необходимом значении $U = 0,314$ В. Напряжение имеет функцию отклика, который на практике не регулируется.
6. Проверка параметра: контроль уровня шлама в допустимых пределах $H_{\text{ш}} < 0,4$ м (нет замыкания в нижней части электрода)
7. Проверка уровня электролита.
8. Проверка параметра концентрации серной кислоты в электролите.
9. Начало сканирования тепловизором по поверхности ячейки (ванне).
10. Определить зоны перегрева электролита (с короткими замыканиями). Указать на экране номера катода и анода.
11. Устранить короткое замыкание и зафиксировать время (тайминг).
12. Направить шлам на слив в приемник.
13. Добавить электролит до заданного целевого уровня.
14. Добавить серной кислоты в электролит до целевого значения концентрации.
15. Вывод на экран отчета о процессе изменения параметров электролиза.
16. Завершение процесса корректировки параметров электролиза.
17. Стабилизация процесса и вывод на нормальный технологический режим

На основе представленного выше алгоритма, спроектирована функциональная схема системы управления высотой шламовых осадков технологического процесса электролитического рафинирования меди (рисунок 4.12).

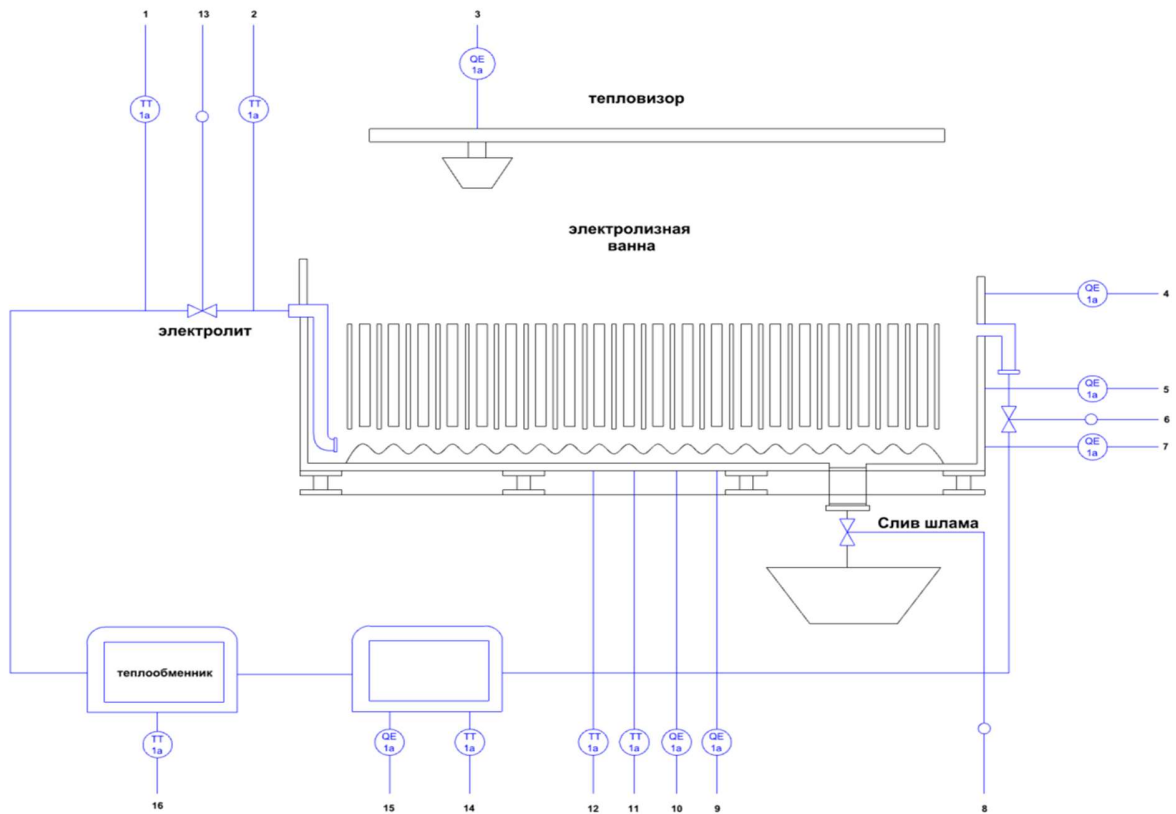


Рисунок 4.12 – Функциональная схема автоматизации системы управления высотой шламовых осадков электролитической ванны для рафинирования меди.

4.3 Разработка программы цифрового автоматизированного контроля основных параметров процесса рафинирования катодной меди

Для создания программы ЭВМ была использована экспериментальная физическая модель (цифровой двойник), разработанная для автоматизированного контроля и регулирования основных параметров, а также для обнаружения дендритных и шламовых параметров в процессе электролитического рафинирования меди [43].

В соответствии с изменениями, происходящими на электролизере, может изменяться межэлектродное расстояние, а следовательно, и уставка по напряжению. Дополнительно, при обнаружении значительных отклонений, может быть изменена и амперная нагрузка.

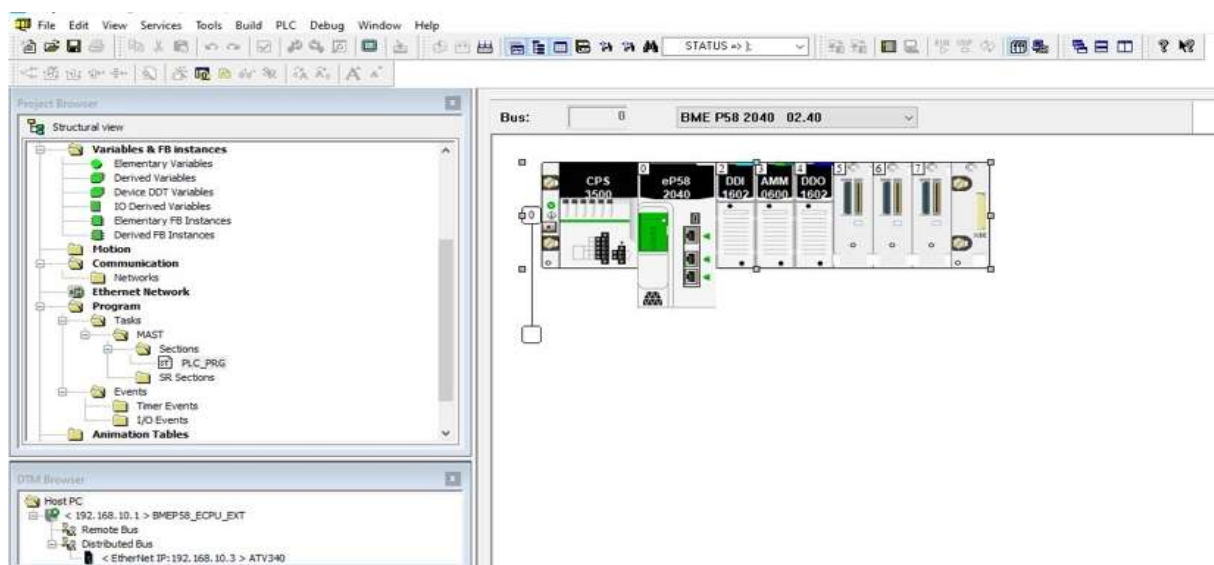


Рисунок 4.13 – Скрин-шот разработанной программы контроля шламового осадка и дендритных сростаний

В результате, в ходе изучения проблем устойчивой работы электролизных ячеек, была создана система контроля и управления основными параметрами процесса производства катодной меди. Программное обеспечение состоит из следующих продуктов(рисунок 4.13):

- Блок питания VMXCPS3500;
- Процессорный модуль Modicon M580 P58 2040;
- Модуль дискретного ввода VMXDDI 1602, число дискретных входов:16;
- Модуль аналогового входа-вывода VMXAMM0600, число дискретных входов: восемь в соответствии с EN/IEC 61131-2;
- Модуль дискретного выхода VMXDDO 1602, число аналоговых входов:16.

Программное обеспечение разработано в среде Unity XL Pro от компании Schneider Electric и русифицировано для применения в среде SE (System Electric).

Дополнительные функции управления процессом через АСУ ТП позволяют более эффективно и своевременно устранять технологические отклонения. Повышение частоты замены катодов и операции шламоудаления приводит к снижению экономических показателей процесса.

В работе установлено, 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.

Обоснована необходимость внедрения для дополнительного контроля за процессом датчиков уровня шламового осадка для снижения безвозвратных потерь при отсутствии замыканий

дендритного осадка на электроды в нижней донной части электролизера. Построены модели образования катодного осадка (шлама) и дендритных замыканий на электродах. Анализ возможных проблем и отклонений, связанных с образованием шламового осадка, дал возможность смоделировать ряд возможных сценариев.

Разработанный алгоритм управления и программа ЭВМ для дополнительных действий в системе АСУ ТП позволяет снизить энергетические потери (на 12-15%) 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).

4.4 Экономическая эффективность предлагаемого решения

Экономическая эффективность проекта была рассчитана после внедрения тепловизионной камеры для обнаружения коротких замыканий, и программное обеспечение отображает результаты сканирования электролизной ванны. Данные, полученные до и после использования тепловизионной камеры, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результат проверки электролизеров.

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

Используя сканирующие тепловизоры как часть цифровой системы контроля, можно выявить любые короткозамкнутые катоды и зафиксировать момент начала отклонения и скорость увеличения площади с помощью таймера. Стандартное расположение катодов позволяет точно определять количество коротких замыканий и эффективно измерять температуру электролита и площадь самого замыкания. Благодаря данной системе время обнаружения и устранения отклонений сокращается в три раза.

Выводы к главе 4

Четвертая глава описывает разработку программы цифрового автоматизированного контроля процесса электролитического рафинирования меди. Основное внимание уделено созданию виртуальной модели электролизера, которая помогает определить влияние осадка на дне ванны на качество меди и параметры процесса электролиза. Внедрение системы управления с датчиками контроля уровня осадка и температуры повышает точность и оперативность контроля, что улучшает эффективность производства и снижает энергозатраты.

Экономическая эффективность системы подтверждена снижением энергетических потерь на 12-15% и увеличением выхода по току на 2%. Использование тепловизоров для обнаружения коротких замыканий значительно сокращает время проверки и устранения отклонений. Рекомендовано внедрение разработанной системы на предприятии «Медеплавильный завод» (г. Лаокай, Вьетнам) для повышения производительности и снижения затрат.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёшин, Н. П. Применение методов неразрушающего контроля для оценки качества готовых деталей аддитивного производства / Н. П. Алёшин, М. В. Григорьев, Н. А. Щипаков, М. А. Прилуцкий, В. В. Мурашов // Дефектоскопия. - 2016. - № 10. - С. 63-75.- ISSN 0130-3082. - Текст : непосредственный.
2. Афанасьев, В. Б. Современные методы неразрушающего контроля. Успехи современного естествознания / В. Б. Афанасьев, Н. В. Чернова // Успехи современного естествознания. - 2011. – № 7. - С. 73-74. - ISSN 1681-7494. - Текст : непосредственный.
3. Баймаков, Ю. В. Электролиз в гидрометаллургии: Учебное пособие / Ю. В. Баймаков, А. И. Журбин – Metallurgizdat, 1963. - 336 с.
4. Баймаков, Ю.В. Электролиз в гидрометаллургии / Ю.В. Баймаков, А.И. Журин. – М.: Metallurgizdat, 1963. - 616 с.
5. Берг, И. А. Исследование методов анализа ИК-тепловизионных изображений горящего факела / И. А. Берг, С. В. Поршнева // Научная визуализация.- 2020. - №12. – С. 37-52.
6. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля / В.П. Вавилов – Москва : Машиностроение, 1991. – 240 с. – Текст : непосредственный.
7. Ванюков, А.В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья / А.В. Ванюков, Н.И. Уткин. – Челябинск: Metallургия, 1988. - 432 с.
8. Вольхин, А. И. Анодная и катодная медь (физико-химические и технологические основы): учебник / А. И. Вольхин, Е. И. Елисеев, В. П. Жуков, Б. Н. Смирнов. - Юж.-Урал: Челябинск, 2001. - 431 с. - ISBN 978-5-94839-837-2. . - Текст : непосредственный.
9. Гавриленко, А. Н. Метод ЯМР $^{63,65}\text{Cu}$ в локальном поле в исследовании рудных медных концентратов / А. Н. Гавриленко, Р. В. Старых, И. Х. Хабибуллин, В. Л. Матухин // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2014. - Т. 57. № 9. - С. 31–35.
10. Голик, В. И. Упрочнение ресурсной базы металлургии комбинированием технологий добычи руд / В. И. Голик, А. В. Титова // Журнал Горная промышленность. - 2022. - № 9. - С. 47-50. - ISSN 1609-9192. - Текст : непосредственный.
11. Гронь, Д.Н. Информационно-управляющая система процессом электролитического рафинирования меди / Д. Н. Гронь, Б. М. Горенский // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2009. - № 2(3). - С. 301-310.
12. Гронь, Д.Н., Повышение эффективности управления процессом электролитического рафинирования меди с помощью СППР / Д. Н. Гронь, А. Ш. Любанова, С. В. Ченцов // Фундаментальные исследования. - 2013. - № (8-4). – С. 822-827.

13. Девяткин, П. Н. Разработка и исследование способа разделения никеля и меди в растворах / П. Н. Девяткин // Записки Горного института. – 2002. - Том 152. - С. 199.
14. Дегтярева, О. И. Биржевое дело / О. И. Дегтярева, О.А. Кандинская. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1997. - 495 с.
15. Дистлер, В. В. Условия образования оруденения платиновых металлов в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля / В. В. Дистлер, М. А. Крячко, В. В. Юдовская// Геология рудных месторождений. - 2003. - Т. 45. № 1. - С. 44–74.
16. Есин, О. А. Поведение мышьяка, сурьмы и благородных металлов при интенсификации электролитического рафинирования меди / О. А. Есин, А. И. Левин, М. А. Лошкарёв, Л. Г. Левиан // Цветные металлы. – 1945. - № 3. – С. 30-33.
17. Ефимов, А. Г. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля для контроля накопления поврежденности в конструкционных сталях и сплавах (обзор) / А. Г. Ефимов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. - № 86(8). С. 49-57.
18. Загородников, М. П. О содержании взвешенного шлам в электролите при электролитическом рафинировании меди / М. П. Загородников, Н. И. Останин // Проблемы электрохимии и коррозии металлов. Межвузовский сборник. -Свердловск: Изд. УПИ. - 1977. – С. 95-97.
19. Иванов, А. А. Технологии селективной выемки маломощных рудных тел с применением малогабаритного самоходного оборудования / А. А. Иванов, Б. Б. Петров // Журнал Горная промышленность. - 2023. - № 2. - С. 32-37. URL: <https://mining-media.ru/ru/article-base/17075-tekhnologii-selektivnoj-vyemki-malomoshchnykh-rudnykh-tel-s-primeneniem-malogabaritnogo-samokhodnogo-oborudovaniya> (дата обращения: 20.05.2024).
20. ИЗУЧЕНИЕ БИОГРАФИЧЕСКИХ СВЕДЕНИЙ В КУРСЕ ФИЗИКИ (НА ПРИМЕРЕ ОЖ ФРЕНЕЛЯ) / Р. Р. Газизов // ББК 87.6 я43 Ч–39, 39. – 2019.
21. Кадыров, Э. Д. Комплексная автоматизированная система управления пиromеталлургическим производством меди / Э. Д. Кадыров // Записки Горного Института. - 2011. - Т. 192. - С. 120-124.
22. Кистяковский, Б. Б. Производство цветных металлов / Б. Б. Кистяковский, Н. В. Гудима, Н. Н. Ракова, Г. П. Ермаков, Г. М. Волкогон, А. А. Розловский. - М.: Металлургия, 1984. - 280 с.
23. Козлов, П. А. Рафинирование меди / П. А. Козлов, С. С. Набойченко, Б. Н. Смирнов // М.: Металлургия. – 1992. - 268 с.

24. Лахтин, Ю. М. *Материаловедение* / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева - М.: Машиностроение. - 1990. - 246 с.
25. Мاستюгин, С. А. *Шламы электролитического рафинирования меди и никеля* / С. А. Мاستюгин, Н. А. Волкова, С. С. Набойченко, М. А. Ласточкина - Екатеринбург : УрФУ. – 2013. - 256 с.
26. *Методы неразрушающего контроля изделий машиностроения, изготовленных из полимерных композиционных материалов (обзор)* / Е. А. Косенко // Ремонт. Восстановление. Модернизация. - 2020. - № 1. - С. 12-17.
27. *Мировой и российский рынок рафинированной меди 2019-2025: аналитический обзор*. - М.: METALRESEARCH (LLC), 2019. - май. – 272 с.
28. Молошаг, В. П. *Новые данные о сульфидах меди и серебра в рудах колчеданных месторождений Урала* / В. П. Молошаг, С. В. Колотов, Т. Я. Гуляева // Уральский минералогический сборник. - 1995. - № 5. - С. 223-231.
29. Нижник, А. Е. *Классификация современных методов неразрушающего контроля. Возможность их применения для диагностики оборудования нефтегазовой отрасли* / А. Е. Нижник, А. В. Поляков, В. В. Дубов, М. Г. Приходько, Н. Д. Ханюченко / Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2020. - № 5. – С. 41-46.
30. Орлова, А. В. *Общие критерии выбора и виды технологических схем переработки медных руд* / А. В. Орлова, В. А. Таранов // Вестник Кольского научного центра РАН. - 2019. - № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obschie-kriterii-vybora-i-vidy-tehnologicheskikh-shem-pererabotki-mednyh-rud> (дата обращения: 06.05.2024).
31. Павлов, С. Н. *О системе управления электролизным переделом цеха электролиза меди, Медный завод ЗФ ГМК «Норильский никель»* / С. Н. Павлов // СибГАУ им. академика М.Ф. Решетнева. - 2024. - С. 1-4.
32. Пакулев, М. *Применение метода тепловизионного контроля при диагностировании металлургических агрегатов* / М. Пакулев, Я. Федотов, В. Рыбин // ТехНадзор. – 2015. - № 10. – С. 303-304.
33. Патент № 20060827 Российская Федерация на полезную модель. RU 55779 U1. 2006: *Устройство для обнаружения коротких замыканий в ваннах электролиза меди*. [Электронный ресурс] / А. И. Вольхин, Н. М. Чухланцев, И. Д. Плеханов и др. // Бюл. - 2006. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU55779U1_20060827.pdf (дата обращения 19.02.2024).
34. Патент № 2187579 С2 Российская Федерация, МПК С25С 1/12, С25С 7/00. *Электролизная блок-серия ванн для электролитического рафинирования меди и способ*

электролитического рафинирования меди : № 2000124974/02 : заявл. 02.10.2000 : опубл. 20.08.2002 / В. А. Козлов, Е. А. Чижов, А. И. Вольхин, С. С. Бобов ; заявитель Открытое акционерное общество "Уральский научно-исследовательский и проектный институт медной промышленности "Унипромедь".

35. Поляков, А. В. Классификация современных методов неразрушающего контроля. Возможность применения для диагностики оборудования нефтегазовой отрасли. / А. В. Поляков, В. В. Дубов, М. Г. Приходько, Н. Д. Ханюченко // In Наука. Новое поколение. Успех. – 2020. – С. 138-142.

36. Применение метода тепловизионного контроля при диагностировании металлургических агрегатов. – Текст : электронный // Официальный сайт СоюзТехГаз : [сайт]. – URL:

https://souzgaz.ru/articles/primenenie_metoda_teplovizionnogo_kontrolya_pri_diagnostirovanii_metallurgicheskikh_agregatov/?ysclid=lwoyzu09y7473093611 (дата обращения: 27.05.2024).

37. Производство меди. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 3-2015. - М.: Бюро НТД, 2015. - 344 с.

38. Распопова, Н. С. Влияние режима импульсного электролиза на эффективность очистки растворов от катионов меди / Н. С. Распопова, Е. А. Савельева, М. П. Дикун, Н. Д. Соловьева // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. - № 19(13).

39. Родниченко, Е. К. Методы определения короткого замыкания при электролитическом рафинировании меди / Е. К. Родниченко, М. Е. Трифонова, А. А. Данилова // World science: problems and innovations : Сборник статей XLIX Международной научно-практической конференции, Пенза, 25 декабря 2020 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.). - 2020. - С. 90-94.

40. Руководящие документы Госгортехнадзора России "Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей" от 02.06.1999 № РД 11-288-99. <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293841/4293841479.htm>

41. Салимжанова, Е. В. Разработка и внедрение технических решений, обеспечивающих соответствие качества катодной меди 3Ф требованиям Лондонской биржи металлов / Е. В. Салимжанова, А. И. Девочкин, Е. В. Юдин, Д. Д. Карпушова // Цветные металлы. – 2018. – № 6. – С. 44-51. DOI: 10.17580/tsm.2018.06.06.

42. 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».

43. 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. Нгуен, В. Ю. Бажин, М. А. Пилипушко ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

44. Соз, К. М. Влияние осаждения ярозита на баланс железа при кучном биологическом выщелачивании на медном руднике Монива / К. М. Соз, Р. Руан, Я. Цзя, Ц. Тан, Ч. Ван, Ц. Ши, Ч. Чжонг, Х. Сун // Записки Горного института. – 2021. - Том 247. - С. 1-12. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.11.

45. Спиринов, Н. А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н. А. Спиринов, В. В. Лавров, В. Ю. Рыболовлев, Л. Ю. Гилева, А. В. Краснобаев, В. С. Швыдкий, О. П. Онорин, К. А. Щипанов, А. А. Бурыкин // Екатеринбург. - 2014. - 553 с.

46. Степанов, В. А. Минералы благородных и редких металлов в рудах Шанучского медно-никелевого месторождения (Камчатка) / В. А. Степанов, В. И. Гвоздев, Ю. П. Трухин, В. Е. Кунгурова, Г. Б. Молчанова // Записки Российского минералогического общества. - 2010. - Т. 139. № 2. - С. 43–58.

47. Фомичева, О. А. Методы распознавания ИК-изображения / О. А. Фомичева, С. И. Стреляев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. № 11. – С. 207-213.

48. **Хоанг, Н. Х.** Совершенствование системы контроля и управления параметрами электролитического рафинирования меди / Н. Х. Хоанг, В. Ю. Бажин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 5-16. – DOI 10.17073/0021-3438-2023-3-5-16.

49. Худяков, П. Ю. Автоматическая система идентификации коротких замыканий в электролизных ваннах / П. Ю. Худяков, С. В. Федорова, А. Ю. Симонов, И. М. Старцев, В. А. Лаптев // Датчики и системы. – 2020. – № 9-10(251). – С. 61-66. - DOI: 10.25728/datsys.2020.9-10.11.

50. Шаламов, А. В. Нейронные сети как новый подход к управлению технологическим оборудованием / А. В. Шаламов, П. Г. Мазеин // Известия Челябинского научного центра. - 2003. - Вып. 1. - С. 60-64.

51. Шульга, Е. В. Методика оценки качества поверхности медных катодов / Е. В. Шульга, А. И. Юрьев, М. И. Базанов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2019. Т. 62. - Вып. 2. - С. 53-58.
52. Шульга, Е.В. Влияние тиомочевины на показатели процесса электрорафинирования меди в сульфат-хлоридном электролите / Е. В. Шульга, И. С. Кузьмина, В. В. Рябинин, А. И. Юрьев // Научный вестник Арктики. - 2017. - № 1. – С. 6-10.
53. Щербинский, В. Г. Ультразвуковой контроль сварных соединений / В. Г. Щербинский, Н. П. Алешин // Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2000. – 185 с.
54. Aghamirian, M. Electrowinning of copper from sulfate electrolyte in presence of a sulfuric acid-based additive / M. Aghamirian, P. Setoodeh // *Electrochimica Acta*. – 2018. - Vol 283. – pp. 1017-1025. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.06.198.
55. Anouncia, S. M. Non-destructive testing using radiographic images a survey / S. M. Anouncia, R. Saravanan // *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2006. - Vol 48(10). – pp. 592–597. DOI:10.1784/insi.2006.48.10.592.
56. Bartlett, R.W. Recent advances in copper refining technology / R.W. Bartlett // *Journal of Mining and Metallurgy Section B: Metallurgy*. - 2014. - Vol 50(1). – pp. 1-9. DOI: 10.2298/JMMB1401001B.
57. Bazhin, V. Y. Vietnamese metallurgy on the way out of the crisis with the use of automated control systems / V. Y. Bazhin, **Н. Н. Nguyen** // *AIP Conference Proceedings: 2, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – P. 030018. – DOI 10.1063/5.0092750.*
58. Bazhin, V. Yu. Increasing the speed of information transfer and operational decision-making in metallurgical industry through an industrial bot / V. Yu. Bazhin, O. N. Masko, **Н. Н. Nguyen** // *Non-Ferrous Metals*. – 2023. – Vol. 1. – P. 62-67. – DOI 10.17580/nfm.2023.01.10.
59. Bian, Y. Graphite/copper phthalocyanine composite cathode for overcharge protection and gas evolution suppression in aluminum-ion batteries at room temperature / Y. Bian, L. Su, Z. Yu, H. Chen, Y. Zhou, M. Lin // *Electrochimica Acta*. - 2019. Vol. 135188. - pp. 1-23. DOI: [10.1016/j.electacta.2019.135188](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135188).
60. Chen, X. Simulation and analysis of copper electrowinning process control based on data-driven model / X. Chen, Y. Ma, Y. Zhou, Z. Zhang, J. Hu // *Control Engineering Practice*. - 2017. - Vol 58. - pp.1-10. DOI: 10.1016/j.conengprac.2016.10.015.
61. Correa, P. P. Forecasting copper electrorefining cathode rejection by means of recurrent neural networks with attention mechanism / P. P. Correa, A. Cipriano, F. Nuñez, J. C. Salas, H. Lobel // *IEEE Access*. - 2021. - Vol 9. – pp. 79080-79088.

62. Devos, O. Growth of electrolytic copper dendrites. III: Influence of the presence of copper sulphate / O. Devos, C. Gabrielli, L. Beitone, C. Mace, E. Ostermann, H. Perrot // *J. Elect. Chem.* – 2007. – Vol. 606. - pp. 95-102.
63. Devos, O. Growth of electrolytic copper dendrites. I: Current transients and optical observation / O. Devos, C. Gabrielli, L. Beitone, C. Mace, E. Ostermann, H. Perrot // *Journal of Electroanalytical Chemistry.* – 2007. - Vol 606(2). pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.jelechem.2007.03.028.
64. Devos, O. Growth of electrolytic copper dendrites. II: Oxalic acid medium / O. Devos, C. Gabrielli, L. Beitone, C. Mace, E. Ostermann, H. Perrot // *Journal of Electroanalytical Chemistry.* – 2007. - Vol 606(2). – pp. 85–94. DOI: 10.1016/j.jelechem.2007.05.003.
65. Devos, O. Growth of electrolytic copper dendrites. III: Influence of the presence of copper sulphate / O. Devos, C. Gabrielli, L. Beitone, C. Mace, E. Ostermann, H. Perrot // *Journal of Electroanalytical Chemistry.* – 2007. - Vol 606(2). – pp. 95–102. DOI: 10.1016/j.jelechem.2007.05.002.
66. Ding, L. Characteristic and control of electrochemical oscillation at the anode during electrolytic refining copper / Ding, L., Li, Q., Yuan, J., Dong, X., Peng, D., Li, B., Niu, Y. // *International Journal of Electrochemical Science.* – 2020. - Vol 15(9). – pp. 9532–9542. DOI: 10.20964/2020.09.85.
67. Dwivedi, S. K. Advances and researches on non-destructive testing: a review / S. K. Dwivedi, M. Vishwakarma, P. A. Soni // *Materials Today: Proceedings.* – 2018. - Vol 5(2). – pp. 3690–3698. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.620.
68. Felder, A. Lead alloys for permanent anodes in the nonferrous metals industry / A. Felder, R.D. Prengaman // *JOM.* – 2006. - Vol. 58. - pp. 28-31.
69. Feng, W. A Theoretical model for metal cation reduction in the flow field and its application to copper electrorefining / W. Feng, H. Cao, Y. Shen, S. Xu, H. Zhang, G. Zheng // *International Journal of Electrochemical Science.* – 2022. – Vol. 17. - pp. 220-236, DOI: [10.20964/2022.02.38](https://doi.org/10.20964/2022.02.38).
70. Gabe, D. R. Dendritic formation and the effects of addition agents in the electrodeposition of copper from acid sulphate solutions / D. R. Gabe, D. J. Robinson // *Transactions of the IMF.* – 1971. - Vol. 49(1). - pp. 17–21. DOI: [10.1080/00202967.1971.11870160](https://doi.org/10.1080/00202967.1971.11870160).
71. Gabe, D.R. Department of metallurgy university of sheffield dendritic formation and the effects of addition agents in the electrodeposition of copper from acid sulphate solutions / D.R. Gabe, D.J. Robinson // *Journal of Surface Engineering and Coatings.* – 1971. - Vol. 49. - pp. 17-21.
72. Gazaleeva, G. I. Process flow design for upgrading rough concentrates containing fine slimes of tin and copper minerals / G. I. Gazaleeva, L. N. Nazarenko, V. N. Shigaeva. - 2018. - Vol 6(378). - pp. 20-26. DOI: [10.17580/or.2018.06.04](https://doi.org/10.17580/or.2018.06.04).

73. Gholizadeh, S. A review of non-destructive testing methods of composite materials / S. Gholizadeh // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 1. – pp. 50–57. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.02.008.
74. Goc, K. Structure, morphology and electrical transport properties of the Ti₃AlC₂ materials / Goc K., Prendota W., Chlubny L., Strączek T., Tokarz W., Chachlowska P., et al. // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44(15). – pp. 18322-18328. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.045.
75. Han, J. H. Over-limiting current and control of dendritic growth by surface conduction in nanopores / J. H. Han, E. Khoo, P. Bai // *Scientific reports*. – 2014. – Vol. 4(1), 7056. – pp. 1-8. DOI: 10.1038/srep07056.
76. Han, J. H. Dendrite Suppression by Shock Electrodeposition in Charged Porous Media / J. H. Han, M. Wang, P. Bai, F. R. Brushett, M. Z. Bazant // *Scientific reports*. – 2016. – Vol.16(6), 28054. - DOI: 10.1038/srep28054.
77. Han, J. H. Exploring the Interface of Porous Cathode/Bipolar Membrane for Mitigation of Inorganic Precipitates in Direct Seawater Electrolysis / J. H. Han // *ChemSusChem*. – 2022. Vol. 15(11). - DOI: 10.1002/cssc.202200372.
78. International Copper Alliance (2020). *Copper Bulletin 2020*. International Copper Alliance, Brussels.
79. Izutani, N. Influence of current density on the cathodic copper deposition behavior in high-speed copper electrorefining / N. Izutani, H. Minato, H. Kinoshita // *Metallurgical and Materials Transactions B*. - 2019. – Vol. 50(5). – pp. 2155-2162. - DOI: 10.1007/s11663-019-01581-9.
80. Jianxin, L. Cause of formation of nodular copper particles on electrorefined copper substrate. / L. Jianxin, L. Xueliang, H. Chen, H. Jianbo // *Trans. Nonferrous Metals Sos. China*. – 1994. – Vol.4. - pp. 52-55.
81. Jingya, L. The effect of nodulation on the distribution of concentration and current density during copper electrolytic refining / L. Jianxin, L. Xueliang, H. Chen, H. Jianbo // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2285. – pp. 12-15. - DOI: 10.1088/1742-6596/2285/1/012015.
82. Jones, R. Recent developments in ultrasonic testing techniques / R. Jones, A. Patel // *Materials Evaluation*. – 2019. Vol. 77(6). – pp. 800-807. - DOI: 10.32604/EE.2019.06174.
83. Kantemirov, V. D. Improvement of mineral processing methods in mining structurally-complex deposits / V. D. Kantemirov, A. M. Yakovlev, R. S. Titov, A. V. Timokhin // *Russian Mining Industry*. – 2022. - pp. 63-70. DOI: 10.30686/16099192-2022-1S-63-70.

84. Kizilov, S. A. Technological equipment control system using virtual reality devices / S. A. Kizilov, M. S. Nikitenko, D. Yu. Khudonogov, B. Neogi, D. O. Verkhovtsev // *Russian Mining Industry*. - 2023. - Vol. 5. - pp. 124-129. - DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5-124-129.
85. Kouche, A. E. Ultrasonic non-destructive testing (NDT) using wireless sensor networks / A. E. Kouche, H. S. Hassanein // *Procedia Computer Science*. - 2012. – Vol. 10. – pp. 136–143. DOI: 10.1016/j.procs.2012.06.021.
86. Le, T. H. Effect of Impurity Elements on the Performance of Copper Electrowinning / T. H. Le, T. N. Nguyen, T. D. Tran, T. T. Pham // *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 13(4). – pp. 28-36. - DOI: 10.31814/stce.nuce2019-13(4)-04.
87. Li, Y. Development of Technologies to Reduce Environmental Risk in Extracting Gold from Refractory Ores / Y. Li, L. Zhuo, I. V. Shadrinova, A. K. Ermamatov, T. V. Chekushina // *Russian Mining Industry*. – 2020. – Vol.6. – pp. 143-147. - DOI: 10.30686/1609-9192-2020-6-143-147.
88. Litvinenko, V. S. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development / V. Litvinenko // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. – 2018. – Vol. 1. - pp. 3–16. ISBN 9780429462078.
89. Litvinenko, V. S. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling / V. S. Litvinenko, G. L. Leitchenkov, N. I. Vasiliev // *Chemie der Erde*. – 2020. – Vol. 80(3), 125556. – DOI: 10.1016/j.chemer.2019.125556.
90. Litvinenko, V. S. Global guidelines and requirements for professional competencies of natural resource extraction engineers: Implications for ESG principles and sustainable development goals / V. Litvinenko, I. Bowbrick, I. Naumov, Z. Zaitseva, // *Journal of Cleaner Production*. - 2022. - Vol. 338(130530). – pp. 2-9. - DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130530.
91. Litvinenko, V. S. Correction to: Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector / V. S. Litvinenko // *Natural Resources Research*. - 2020. - Vol. 29(3). – pp. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4.
92. Mansouri, N. A new feature extraction technique based on improved owl search algorithm: a case study in copper electrorefining plant / N. Mansouri, G. R. Khayati, H. Z. Mohammad // *Neural Computing and Applications* – 2022. – Vol. 34(10). – pp. 7749–7814. – DOI: 10.1007/s00521-021-06881-z.
93. Mohammad, R. S. Investigating the nodulation mechanism of copper cathode based on microscopic approach: As a punch failure factor / R. S. Mohammad, R. K. Gholam, J. K. Mohammad, K. H. Roya // *Engineering Failure Analysis*. - 2022. – Vol. 133, 105970. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105970.

94. Mubarak, M. Z. Dendritic cathode growth during copper electrorefining in the presence of solid particles / M. Z. Mubarak, I. Filzwieser, P. Paschen // *Erzmetall.* – 2005. – Vol. 58(6), 315. – pp. 1-9.
95. Nguyen, D. H. Study on the influence of operating parameters on copper electrowinning process / D. H. Nguyen, T. V. Nguyen, V. N. Nguyen, L. H. Dang // *Vietnam Journal of Science and Technology.* – 2016. – Vol. 54(4). – pp. 439-448. - DOI: 10.15625/2525-2518/54/4/7734.
96. **Nguyen, H. H.** Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation / H. H. Nguyen, V. Y. Bazhin // *Metallurgist.* – 2023. – Vol. 67, No. 1-2. – P. 41-50. – DOI 10.1007/s11015-023-01487-3.
97. Nguyen, T. H. Optimization of copper electrowinning process parameters using response surface methodology / T. H. Nguyen, T. T. Le, H. T. Vo, H. T. Do // *Vietnam Journal of Science and Technology.* – 2021. - Vol. 55(6). – pp. 664-674. - DOI: 10.15625/2525-2518/55/6/9945.
98. Nikonova, G. Automated System for Visual Non-Destructive Testing / G. Nikonova, A. Nikonov, Y. Zakirova, V. Makarochkin // *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED).* - 2021. – pp. 1-5. - DOI:10.1109/sed51197.2021.9444529.
99. Pham, V. H. Optimization of Copper Electrowinning Process Parameters Using Response Surface Methodology / V. H. Pham, T. V. Nguyen, D. H. Nguyen, N. T. Tran // *Journal of Science and Technology in Civil Engineering.* – 2018. – Vol.12(4). – pp.131-138. - DOI: 10.31814/stce.nuce2018-12(4)-13.
100. Qingyu, Z. Analysis of interelectrode short-circuit current in industrial copper electrorefining cells / Z. Qingyu, L. Chun, M. Yi, T. Jun, Z. Rentao, Z. Zhifang // *Measurement.* – 2020. – Vol.164, 108015.- DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108015.
101. Saltykova, S. N. Analysis of data on crystallochemical nature of the phases of the copper-nickel matte and a binary system Co–S / S. N. Saltykova, G. I. Dolivo-Dobrovolskaya, A.V. Maksimova // *Journal of Mining Institute.* – 2013. - Vol. 202. – pp. 202-209.
102. Selivanov, E. N. Impurity Distribution During Electrolytic Refining of Antimony / E. N. Selivanov, S. V. Sergeeva, A. A Korolev, K. L Timofeev, S. A. Krayukhin, K. V. Pikulin // *Metallurgist.* – 2021. – Vol. 64. – pp.1198–1207. – DOI: 10.1007/s11015-021-01105-0.
103. Shao, W. Dendritic growth and morphology selection in copper electrodeposition from acidic sulfate solutions containing chlorides / W. Shao, G. Zangari // *The Journal of Physical Chemistry C.* – 2009. – Vol.113(23). – pp. 10097-10102. - DOI: 10.1021/jp8095456.
104. Shao, W. Electrolytic gold deposition on dodecanethiol-modified gold films / W. Shao, G. Pattanaik, N. Swami, G. Zangari // *Langmuir.* – 2009. – Vol. 25(9). – pp.5031-5038. - DOI: 10.1021/la803907p.

105. Smith, J. *Advances in Nondestructive Testing Technologies* / J. Smith, L. Johnson // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2018. – Vol. 37(3). – pp.1-12. - DOI: 10.1007/s10921-018-0470-7.
106. Sonawane, J. M. *Polyaniline-Copper Composite: A Non-precious Metal Cathode Catalyst for Low-Temperature Fuel Cells* / J. M. Sonawane, D. Pant, P. C. Ghosh, S. B. Adeloju // *Energy & Fuels*. - 2021. - Vol. 35(4). – pp.3385–3395. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c04152.
107. Sun, R. *Abnormal Conductive State Identification of the Copper Rod in a Nickel Electrolysis Procedure Based on Infrared Image Features and Position Characteristics* / R. Sun, G. Qin, G. Li, J. Hu, J. Xiong, H. Xu // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol.12(7), 3691. – DOI: 10.3390/app12073691.
108. Tran, T. H. *Investigation of operating parameters affecting the quality of copper electrowinning process* / T. H. Tran, H. V. Nguyen, T. T. Nguyen, T. N. Le // *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. – 2020. - Vol.14(1). – pp.20-28. - DOI: 10.31814/stce.nuce2020-14(1)-03.
109. Van, R. F. M. *Validation of low-cost smartphone-based thermal camera for diabetic foot assessment* / R. F. M. Van, N. J. J Van, B. J. G. Van, M. M. R. Vollenbroek-Hutten., D. H. F. Van // *Diabetes Research and Clinical Practice*. - 2019. - Vol. 149. – pp. 132-139. DOI: 10.1016/j.diabres.2019.01.032.
110. Zhang, H. *Recent Advances in X-ray Radiography and Computed Tomography for Nondestructive Evaluation* / H. Zhang, Q. Wang // *Materials*. -2020. – Vol.13(2), 421. DOI: 10.3390/ma13020421.
111. Zhang, L. *Current Distribution in Copper Electrodeposition from a Sulfate Solution* / L. Zhang, J. Xue, L. Wang // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2018. – Vol.165(10). -pp. 511-516. - DOI: 10.1149/2.1091810jes.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022614039

**Программа цифрового автоматизированного контроля
процессом электролитического рафинирования меди**

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

Авторы: *Нгуен Хю Хоанг (VN), Бажин Владимир Юрьевич
(RU)*

Заявка № 2022613110

Дата поступления 10 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 16 марта 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Ю.С. Зубов'.

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023665289

**Программа цифрового автоматизированного контроля
основных параметров процесса рафинирования
катодной меди**

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

Авторы: *Нгуен Хю Хоанг (VN), Бажин Владимир Юрьевич
(RU), Пилипушко Мария Александровна (RU)*

Заявка № **2023663835**

Дата поступления **03 июля 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **13 июля 2023 г.**

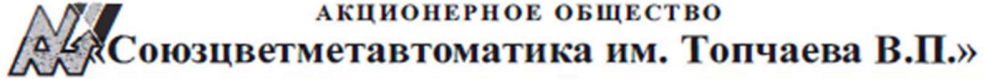


Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акт о внедрении результатов диссертации



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

«Союзцветметавтоматика им. Топчаева В.П.»

125504, Москва, Дмитровское шоссе, 75.

Тел.: (499) 489-10-85; Факс: (499) 489-14-05.

E-mail: scma@scma.ruАдрес в интернет: <http://www.scma.ru>

ОГРН 1037700048561

Утверждаю



Генеральный директор АО «СоюзЦМА»

А.В. Дёмин

Дата « 04 » 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Нгуен Хю Хоанг

соискателя ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами

Комиссия в составе:

Председатель: генеральный директор АО «СоюзЦМА» – к.т.н., Дёмин А.В.;

Члены комиссии: зав. сектором ТО – Соколов И.В., ученый секретарь НТС
Мальцев Н.Е., зав лабораторией №22 Оксенгойт-Грузман Е.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Цифровая
автоматизированная система управления электролитическим рафинированием
меди» рассмотрены на заседании НТС АО «СоюзЦМА» выписка №1/23 от
12.04.2023г. и внедрены в производственную деятельность, а именно

Проведено экспериментальное исследование с использованием способа
контроля коротких замыканий и уровня шламовых осадков в электролитной
ячейке на основе энергических балансов в процессе электролитического
рафинирования меди, оценено влияние короткого замыкания между
электродами на температуру электродов, а также на

эффективность процесса электролиза; использована тепловизионная камера для быстрого обнаружения коротких замыканий.

– использовано программное обеспечение CFD (Star CMM+) для моделирования и оценки влияния уровня шлама на дне электролизера на циркуляцию электролита, качество катодной меди и эффективность процесса электролитического рафинирования меди в целом.

Использование указанных результатов позволило:

- Снизить удельный расход электроэнергии на 10-15%, за счет снижения времени коротких замыканий между электродами;

- Снизить потери ценных компонентов (40-80 г на тонну меди) за счет постоянного контроля шламового осадка в электролизной ванне;

- Повысить эффективность процесса электролитического рафинирования и увеличить выход по току на 7-10% от существующих показателей.

Председатель комиссии:

Генеральный директор
АО «СоюзЦМА», к.т.н.



Дёмин А.В.

Члены комиссии:

Ученый секретарь НТС,
к.т.н.



Мальцев Н.Е.

Зав. сектором АСУ ТП ТО



Соколов И.В.

Зав лабораторией №22,
к.т.н.



Оксенгойт-
Грузман Е.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внедрении результатов диссертации

Утверждаю:



Зам. директора Института горной науки и
технологии, Вьетнам

[Signature] Ныи Вьет Туан
Дата « 15 » 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Нгуен Хю Хоанг

по научной специальности 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами.

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

Председатель: Фам Ван Куан;

Члены комиссии: До Ван Хоанг, Тхан Ван Зуи

Составили настоящий Акт о том, что результаты диссертации на тему «Цифровая автоматизированная система управления электролитическим рафинированием меди», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, могут быть использованы для повышения энергоэффективности электролитического производства катодной меди на предприятии «Медеплавильный завод» (г.Лаокай, Социалистическая Республика Вьетнам)

Внедрение и применение указанных результатов позволяет:

- Снизить удельный расход электроэнергии на 12-15%, за счет снижения времени коротких замыканий между электродами;
- Снизить потери ценных компонентов (40-80 г на тонну меди) электролита за счет постоянного контроля шламового осадка в электролизной ванне;
- Повысить эффективность процесса электролитического рафинирования и выход по току на 7-10% от существующих показателей.

Председатель комиссии

Начальник отдела проектирования и
консультирования горных работ

[Signature] Фам Ван Куан

Члены комиссии:

Заместитель начальника отдела
проектирования и консультирования
горных работ

[Signature] До Ван Хоанг

Главный инженер

[Signature] Тхан Ван Зуи