

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

На правах рукописи

Шестаков Алексей Константинович



РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ
ДАНЫХ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОБОЙНИКА И СИСТЕМЫ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Петров П.А.

Санкт-Петербург – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА КРИОЛИТО-ГЛИНОЗЕМНОГО РАСПЛАВА	10
1.1 Теоретические сведения о процессе электролитического получения алюминия.....	10
1.2 Становление и развитие алюминиевой промышленности в мире и в России.....	29
1.3 Типы и конструкция электролизеров	37
1.4 Основные направления развития алюминиевой промышленности	45
1.5 Инертные аноды и вертикальные электроды	49
1.6 Экономическая оценка состояния алюминиевой промышленности и объемы производства	51
1.7 Выводы по Главе 1	58
ГЛАВА 2 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА	60
2.1 Электролизер как объект управления	60
2.2 Научно – технические достижения в области управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава	61
2.3 Автоматизированная система управления «АЛЮМИНИЙ».....	69
2.4 АСУ ТП криолито-глиноземного расплава «ЭЛЕКТРА»	73
2.5 АСУ ТП криолито-глиноземного расплава «ТРОЛЛЬ».....	80
2.6 АСУ ТП криолито-глиноземного расплава «СААТ»	84
2.7 Иностранные АСУ ТП криолито-глиноземного расплава	89
2.8 Выводы по Главе 2	93
ГЛАВА 3 Экспериментальные исследования и разработка автоматических средств контроля параметров алюминиевого электролизера	94
3.1 Методика экспериментальных исследований	94
3.1.1 Описание лабораторной установки по электролизу криолито-глиноземных расплавов	94
3.1.2 Схема лабораторной ячейки.....	97
3.1.3 Подготовка материалов и лабораторной ячейки к эксперименту по электролизу	97
3.1.4 Шнековый питатель системы АПГ.....	101
3.1.5 Анализ шумов напряжения методом быстрого преобразования Фурье	104
3.1.6 Алюминиевый электрод сравнения	108
3.1.7 Определение скорости коррозии электрода	111
3.2 Экспериментальное исследование температурной зависимости удельного сопротивления анода	114

3.3 Экспериментальные исследования влияния концентрации глинозема на низкочастотную составляющую шумов напряжения в электролизере методом БПФ.....	116
3.3.1 Эксперимент по электролизу криолито-глиноземного расплава	116
3.3.2 Обработка и анализ результатов эксперимента	124
3.4 Разработка автоматической системы измерения уровня электролита с использованием пневмоцилиндра АПГ	136
3.4.1 Выбор средства и способа измерения величины выдвигания штока пневмоцилиндра....	141
3.4.2 Схема установки оптического дальномера в пневмоцилиндр АПГ	142
3.4.3 Принцип работы автоматической системы измерения уровня электролита с использованием малогабаритного оптического дальномера.....	144
3.4.4 Методика эксперимента по исследованию точности оптического дальномера при температуре выше 120 °С.....	145
3.4.5 Результаты эксперимента	147
3.4.6 Сравнение срока службы наконечника пробойного устройства различных устройств для разрушения корки.....	150
3.4.7 Экономический эффект от установки многофункционального пробойного устройства системы АПГ алюминиевого электролизера.....	151
3.5 Выводы по Главе 3	155
ГЛАВА 4 СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИДИМЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭЛЕКТРОЛИЗНОМ ЦЕХЕ АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА.....	157
4.1 Системы и методы очистки выделяемых вредных веществ	157
4.2 Состав вредных веществ, выделяемых в атмосферу в результате процесса электролиза	158
4.3 Лабораторный стенд для сбора данных для обучения нейронной сети	159
4.4 Методика обучения нейронной сети	160
4.5 Результаты обучения и оценка точности обученной нейронной сети	162
4.6 Экономический эффект от разработки автоматической системы мониторинга видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха.....	165
4.7 Аналоги разработанной системы.....	167
4.8 Выводы по Главе 4	169
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	171
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	172
ПРИЛОЖЕНИЕ А Заявка на патент	185

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации	186
ПРИЛОЖЕНИЕ В Код программы шнекового питателя	188
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Удельное сопротивления графитизированного анода марки УНР	192

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Процесс электролиза криолито-глиноземного расплава (КГР) относится к технологическим процессам, функционирующим в условиях неопределенности и агрессивной среды (высокая температура процесса, вредные выбросы, пыление исходного сырья). Существующая система управления технологическим процессом производства алюминия не обеспечивает оперативный контроль и корректировку технологических параметров процесса электролиза КГР, таких как содержание глинозема, уровень электролита, контроль разрушения криолито-глиноземной корки перед процедурой питания оксидом алюминия, а также автоматический контроль наблюдаемых пылегазовых выбросов в электролизном цехе. Интервалы между измерениями для данных параметров могут достигать нескольких суток, а для осуществления измерения требуется производить локальную разгерметизацию створчатых укрытий, что приводит к попаданию вредных веществ, таких как фтористый водород HF, твердые фториды (F_{hard}), диоксид серы SO₂, смолистые вещества, бензапирен C₂₀H₁₂, углекислый газ CO₂, пыль, перфторуглероды (ПФУ) CF₄ и C₂F₆ в атмосферу электролизного цеха.

Уровень электролита является одним из основных контролируемых технологических параметров, который влияет на стабильность технологического процесса и тепловой режим электролизной ванны. Превышение допустимого уровня электролита может приводить к растворению стальных ниппелей анододержателей и загрязнению первичного алюминия. Алгоритм питания, не учитывающий изменение высоты электролита более чем на 2 – 3 см, приводит к изменению криолитового отношения (КО). Отсутствие оперативной оценки содержания глинозема приводит к его снижению, к «голоданию» электролизной ванны с возникновением анодного эффекта (АЭ), либо образованию осадка глинозема на подине. Помимо указанных параметров, существенное влияние на стабильность теплового режима электролизной ванны оказывает состояние укрытия электролизера. Укрытие является важным элементом для стабильности теплового режима электролизной ванны и способствует отводу газов, образующихся в результате технологического процесса. Таким образом, повышение эффективности автоматизированного контроля технологических параметров процесса электролиза КГР, а именно оперативный контроль уровня электролита, содержания глинозема, а также контроль сплошности криолито-глиноземной корки является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение, развитие и усовершенствование процесса электролиза криолито-глиноземного расплава и алгоритмов управления внесли известные российские ученые Федотьев П.П., Ветюков М.М., Беляев А.И., Поляков П.В., Калужский Н.А., Крюковский В.А.,

Минцис М.Я., Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Рапопорт М.Б., Сизяков В.М., Концур Е.П., Бажин В.Ю., Костюков А.А., Пискажова Т.В., Манн В.Х., Цыплаков А.М., Сиразутдинов Г.А., Громыко А.И., а также зарубежные ученые Tabereaux A., Welch B., Dupuis M., Wojarevics V., Reverdy M., Wang J., Thonstad J., Kvande H., Grotheim H., Oye H. Проблемой контроля и управления технологическими параметрами процесса электролиза криолито-глиноземного расплава занимались отечественные и иностранные компании ВАМИ, ОК РУСАЛ, АО «Союзцветметавтоматика», ЗАО «ТоксСофт», Alcoa, Alcan, Pechiney, Hydro Aluminium, Rio Tinto, Emirates Global Aluminium, Chinalco. Однако, разработке автоматических систем определения уровня электролита, оперативной оценке содержания глинозема и обнаружения наблюдаемых выбросов в атмосфере электролизного цеха уделено недостаточно внимания.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.3.3.** Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам:

2. «Автоматизация контроля и испытаний»;

5. «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами»;

14. «Теоретические основы и прикладные методы резервирования контуров управления, повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

Объект исследования – автоматизированная система управления технологическим процессом электролиза криолито-глиноземного расплава.

Предмет исследования – алгоритмы контроля технологических параметров и управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава.

Цель работы – повышение эффективности автоматической системы сбора и обработки технологических параметров алюминиевого электролизера при использовании многофункционального пробойника и системы технического зрения для снижения частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов.

Идея – снижение частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов достигается за счет оперативного контроля дополнительных параметров (уровня электролита, преобладающих низких частот напряжения и наблюдаемых выбросов с поверхности электролизера) на основе использования исполнительного устройства пробивки криолито-глиноземной корки системы автоматической подачи глинозема (АПГ), снабженного датчиком положения для измерения уровня электролита, анализа низкочастотных шумов (амплитуды) напряжения методом быстрого преобразования Фурье для косвенной оценки и согласования текущего содержания глинозема, а также системы технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов вредных веществ.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Провести анализ существующих технических решений в области контроля и управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава.
2. Разработать алгоритм определения уровня электролита в автоматическом режиме без локальной разгерметизации створчатых укрытий.
3. Обосновать схему дозирования глинозема по алгоритму в зависимости от уровня электролита и косвенной оценки содержания глинозема для ведения технологического процесса на низких значениях КО (2,2 – 2,4).
4. Разработать систему мониторинга с использованием технологии технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов веществ в электролизном цехе.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод измерения уровня электролита в автоматическом режиме с использованием модернизированного пневмоцилиндра АПГ с оптическим дальномером и измерительной цепью постоянного тока.
2. Разработан алгоритм питания электролизной ванны, учитывающий изменение значений уровня электролита при каждом цикле питания.
3. Разработана методика контроля разрушения корки криолито-глиноземного расплава, позволяющая поддерживать концентрацию глинозема, при которой не возникает анодный эффект.
4. Разработан алгоритм определения видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха с использованием системы технического зрения и нейронной сети.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработано модифицированное пробойное устройство АПГ с оптическим дальномером, позволяющее измерять уровень электролита в автоматическом режиме (заявка на патент РФ № 2023109899/05, Приложение А).
2. Обосновано уменьшение времени нахождения наконечника пробойного устройства АПГ в электролите для увеличения его срока службы.
3. Разработана система технического зрения для обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе с целью улучшения качества воздуха, что приводит к увеличению скорости обслуживания персоналом (акт внедрения АО «СоюзЦМА» от 11.10.2022 г., Приложение Б).

Методология и методы исследования. Исследования основывались на результатах анализа теоретических и экспериментальных данных в области управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава. Экспериментальные исследования по анализу шумов напряжения методом быстрого преобразования Фурье для косвенной оценки содержания

глинозема в криолито-глиноземном расплаве выполнены на установке для электролиза расплавов на базе научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов». Для решения задачи распознавания наблюдаемых выбросов веществ использовались современные методы обработки изображений при помощи нейронных сетей и программной библиотеки для машинного обучения TensorFlow на базе образовательного центра «Цифровых технологий» Санкт-Петербургского горного университета.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм питания электролизной ванны, использующий косвенную количественную оценку глинозема в криолито-глиноземном расплаве, основанную на анализе шумов напряжения и определении уровня электролита с относительной погрешностью, не превышающей 2%, позволяет поддерживать содержание глинозема на уровне 3,5 %, что приводит к снижению частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов.

2. Алгоритм обработки изображений, полученных системой технического зрения, использующий нейросетевую модель, позволяет обнаруживать нарушения сплошности криолито-глиноземной корки и локализовать место возникновения наблюдаемых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха с точностью не менее 94 %.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием установки для электролиза расплавов и системы АПГ, учитывающей изменение уровня электролита и осуществляющей косвенную оценку содержания глинозема для расчета дозы подачи, а также воспроизводимостью результатов исследований.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (апрель 2021 года, г. Санкт-Петербург).

2. Всероссийский конкурс научных и проектных студенческих работ «Лаборатория РУСАЛа» 1 марта – 23 июня 2021 г.

3. The XVIII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (май 2022 года, г. Санкт-Петербург).

4. 5-й Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» (октябрь 2022 года, г. Москва)

5. The XIX International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (май 2023 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе отечественной и зарубежной научной литературы, посвященной

алгоритмам системы АПГ, разработке модифицированного пробойного устройства АПГ с оптическим дальномером, анализе шумов напряжения для косвенной оценки содержания глинозема в криолито-глиноземном расплаве, а также системы мониторинга с использованием технологии технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов веществ в электролизном цехе, проведение экспериментальных исследований, необходимых для подтверждения эффективности разработанных технологических решений, в подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах (№68, 98, 100, 109, 110), 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 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, кроме того в 1 материалах конференции, индексируемых в международной базе данных Scopus. Подана 1 заявка на патент (Приложение А, пункт списка литературы №24).

Структура диссертации.

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой их них, заключения и списка литературы, включающего 128 наименований. Диссертация изложена на 194 страницах машинописного текста, содержит 104 рисунка, 12 таблиц, 4 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю к.т.н. доценту Петрову Павлу Андреевичу за научное руководство над работой. За ценные научные консультации д.т.н. доценту Кульчицкому Александру Александровичу, д.т.н. профессору Бажину Владимиру Юрьевичу, д.т.н. профессору Горланову Евгению Сергеевичу и к.т.н. доценту Симакову Александру Сергеевичу. Сотрудникам ОК РУСАЛ Кандалакшского алюминиевого завода за возможность прохождения производственной стажировки. За помощь в проведении исследований сотруднику образовательного центра Цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета Николаеву Михаилу Юрьевичу.

ГЛАВА 1 НАУЧНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЛИЗА КРИОЛИТО-ГЛИНОЗЕМНОГО РАСПЛАВА

1.1 Теоретические сведения о процессе электролитического получения алюминия

Электрохимическое разложение глинозема Al_2O_3 в расплаве электролита осуществляется в специальных агрегатах – электролизерах в температурном диапазоне 960 – 970 °С при больших значениях постоянного тока (десятки и сотни кА) и малых значениях напряжения (в диапазоне 5 В при силе тока 300 кА) с осаждением расплавленного алюминия на катоде электролизера. Основным компонентом расплава электролита является криолит Na_3AlF_6 ($3NaF \cdot AlF_3$), а основным сырьем для получения первичного алюминия – глинозем, получаемый из бокситов, нефелинов, алунинов. Температура плавления глинозема составляет 2050 °С, а его растворение в расплавленном криолите происходит при 935 – 940 °С. По физическим характеристикам Al_2O_3 подразделяют на мучнистый и песчаный. Мучнистый глинозем обладает худшей текучестью, подвержен большему распылению из-за меньшего размера частиц, при попадании в электролит агломерируется в куски и падает на дно, песчаный лучше растворяется в электролите, размер кристаллов немного крупнее, меньше пылит.

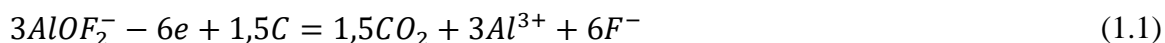
В настоящее время основным сырьем для питания высокоомощных электролизеров на предприятиях ОК РУСАЛ является глинозем марки Г-00. Физические характеристики основных используемых типов глинозема в России представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Физические характеристики типов глинозема. Источник: [8]

Тип глинозема	Удельная поверхность, м ² /г	Угол естественного откоса, °
Мучнистый	5 <	> 45
Песчаный	> 35	30 – 35

В глиноземе не допускается содержание влаги, ее наличие приводит к образованию опасного фтороводорода HF, кроме того, увеличивается расход AlF_3 , изменяется КО. Именно поэтому на производстве глинозем прокачивают перед загрузкой в ванну при температуре 150 – 200 °С для удаления поверхностной воды и при 800 °С для удаления кристаллизационной воды. Также глинозем используют в качестве укрывного материала для криолито-глиноземной корки, что способствует снижению тепловых потерь, стабилизации теплового режима электролизной ванны и частичному улавливанию фторсодержащих газов благодаря его адсорбционным свойствам [10].

Перенос тока в основном осуществляется ионами натрия Na^+ , поэтому разряду на аноде подвергаются оксифторидные комплексные ионы AlOF_2^- , анодный процесс протекает по схеме (1.1) [19]:



Катодный процесс можно представить реакцией (1.2) [19]:



На катоде происходит разряд ионов Al^{3+} и Na^+ , однако натрий не выделяется в виде самостоятельной фазы, а растворяется в жидком алюминии и в электролите.

В процессе электролитического восстановления оксида алюминия, растворенного в расплавленном криолите при температуре $960 - 970$ °С протекают следующие электрохимические реакции (1.3), (1.4), приводящие к разложению глинозема с участием углерода, при этом первичным анодным газом является CO_2 [115]:



При низкой концентрации Al_2O_3 в КГР происходит разложение фторидов по следующим реакциям (1.5), (1.6):



Напряжение разложения компонентов электролита равняется ЭДС гальванической цепи и определяется по формуле (1.7) [6]:

$$E_p^0 = -\Delta_r G_T^0 / (n \cdot F) \quad (1.7)$$

где E_p^0 – стандартная ЭДС гальванической цепи, В;

$-\Delta_r G_T^0$ – изменение энергии Гиббса соответствующей химической реакции, кДж/моль;

n – число электронов, участвующих в реакции (изменение валентности);

F – число Фарадея, 96486 Кл/моль.

Напряжение разложения глинозема зависит от материала анода. Для электролизеров с предварительно обожженными анодами напряжение разложения глинозема для реакций (1.3), (1.4) составляет 1,198 В и 1,085 В, а напряжения разложения фторидов по реакциям (1.5), (1.6) составляет 2,182 В и 2,742 В соответственно при температуре электролита 950 °С [6]. Так как напряжение разложения у Al_2O_3 меньше, то при электролизе происходит разложение глинозема, на катоде выделяется алюминий, а на аноде происходит окисление ионов кислорода.

В промышленности концентрация глинозема в электролизных ваннах не достигает насыщенного состояния и поддерживается в пределах от 2 до 6%. Поэтому напряжение разложения можно определить из уравнения Нернста (1.8) [6]:

$$E_T = E_T^0 - \ln a \left(\frac{R \cdot T}{n \cdot F} \right) \quad (1.8)$$

где E_T^0 – напряжение разложения в насыщенном растворе глинозема в электролите, В;
 T – температура, К;
 a – активность глинозема.

Графики напряжения разложения глинозема от его концентрации для реакций (1.3) (1.4) представлены на рисунке 1.1.

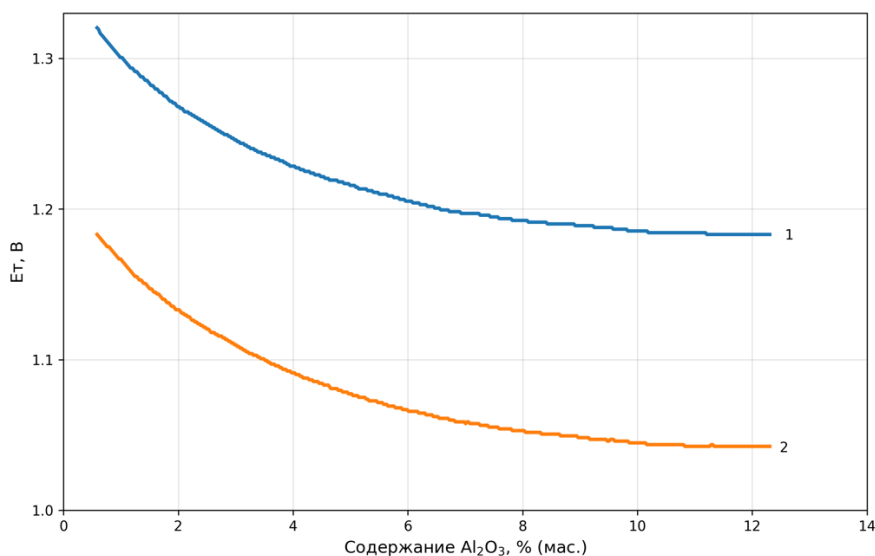


Рисунок 1.1 – Зависимость напряжения разложения глинозема от его концентрации для реакций (1.3) – кривая №1; (1.4) – кривая №2 при температуре электролита 950 °С. Источник: [6]

Пузырьки газа покрывают до 60% площади анода, скорость их движения может составлять до 10 см/с, толщина прианодного диффузионного слоя Нернста составляет около 0,1 мм [8]. Благодаря наличию пузырьков происходит активное перемешивание прианодного слоя, при отсутствии перемешивания данный слой электролита быстро обедняется по ионам кислорода вызывая анодный эффект и процесс электролиза был бы невозможен.

Слой электролита не является однородным по своему составу, в прикатодном слое КО выше на 0,5, в нем же содержится большая часть не растворившегося Al₂O₃ в виде агломератов или отдельных частиц [66].

Основной характеристикой состава электролита является криолитовое отношение, вычисляемое по соотношению (1.9):

$$KO = \frac{NaF}{AlF_3} \quad (1.9)$$

при КО = 3 нейтральный электролит;

КО > 3 щелочной электролит;

КО < 3 кислый электролит.

Добавки в электролит KF, LiF, MgF₂, CaF₂, NaCl увеличивают электропроводность, снижают температуру ликвидуса электролита и потери от испарения электролита (пары фторидов) [66], но также снижают растворимость глинозема. Повышение электропроводности электролита позволяет повысить производительность электролизера за счет увеличения плотности тока на аноде при неизменном межполюсном расстоянии (МПП) [61]. В настоящее время на современных алюминиевых заводах процесс электролиза осуществляют при низких значениях КО (2,2 – 2,4) из-за снижения активности ионов натрия, что приводит к уменьшению скорости обратных реакций и снижению температуры процесса электролиза [66].

Загрузка большой дозы холодного глинозема в электролизную ванну приводит к снижению температуры электролита и образованию на поверхности криолито-глиноземной расплава корки, которая должна быть сплошной, обладать механической прочностью, необходимой толщиной, теплопроводностью и обеспечивать герметизацию ванны. В противном случае при укрытии корки глиноземом последний проваливается, и на подине образуется осадок глинозема. Тонкая корка свидетельствует о низком КО (ниже 2,3) или о перегретом электролите. Корка вместе со слоем глинозема защищает аноды от окисления, фильтрует перфторуглероды, предотвращает чрезмерное выпаривание электролита, участвует в отводе тепла и в питании ванны глиноземом. Свойства корок зависят от типа используемого глинозема и параметров технологического процесса (температура, КО). Прочные корки приводят к чрезмерному износу наконечников пробойных устройств АПГ, а также увеличивают количество осадков на подине электролизера, т.к. при их разрушении для осуществления питания, обломки корки опускаются в слой электролита. Скорость образования криолито-глиноземной корки в зависимости от типа и производителя глинозема составляет в среднем от 0,18 до 0,59 мм/мин [26]. При этом стоит отметить, что при нормальном технологическом режиме между коркой и электролитом всегда существует воздушная прослойка. Лабораторные исследования показывают, что содержание глинозема в твердой корке составляет 30 – 60% [26], таким образом при повышении уровня электролита корка медленно растворяется, в ванну непрерывно попадает глинозем, что теоретически можно использовать как непрерывное питание ванны.

При подаче новой дозы глинозема происходит охлаждение электролита, в результате на поверхности зерен Al₂O₃ образуется тонкий замерзший слой электролита, и только при его плавлении расплав проникает в слой глинозема под воздействием капиллярных сил. Далее происходит переход γ -фазы Al₂O₃ в α -фазу Al₂O₃ [26].

При уменьшении КО теплопроводность корки увеличивается, скорость проникновения электролита уменьшается. Уменьшение температуры электролита приводит к увеличению теплопроводности корки и уменьшению скорости проникновения электролита [7].

На рисунке 1.2 представлена зависимость скорости растворения глинозема от его концентрации в электролите.

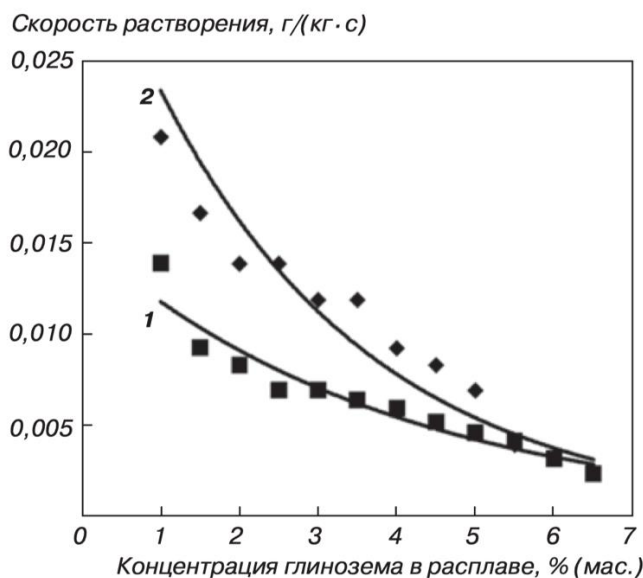


Рисунок 1.2 – График скорости растворения глинозема Ачинского глиноземного комбината при температуре 950 °С для (1) – неактивированного глинозема; (2) – глинозема после механоактивации. Источник: [70]

Скорость растворения глинозема определяется по следующей формуле (1.10) [70]:

$$v_p = \frac{m_{\text{доб}}}{M_{\text{распл}} \cdot \tau} \quad (1.10)$$

где v_p – скорость растворения Al_2O_3 , г/(кг·с);

$m_{\text{доб}}$ – масса добавки глинозема, г;

$M_{\text{распл}}$ – масса электролита, кг;

τ – время растворения добавки, с.

Время растворения дозы глинозема определяется по формуле (1.11):

$$\tau = \frac{m_{\text{доб}}}{M_{\text{распл}} \cdot v_p} \quad (1.11)$$

При снижении концентрации глинозема до 1 – 1,5 % по данным [10] и 0,5 – 1,5 % в соответствии с [44] происходит анодный эффект. Механизм анодного эффекта состоит в следующем: при снижении концентрации глинозема электролит хуже смачивает поверхность электрода, т.к. уменьшается концентрация поверхностно-активного оксида алюминия. При концентрации $\text{Al}_2\text{O}_3 > 1,5\%$ электролит хорошо смачивает поверхность анода, пузырьки CO и CO_2 легко отделяются от поверхности электрода. При меньшем содержании глинозема, когда

достигается некоторое критическое значение плотности тока, значительно увеличивается поверхностное натяжение на границе «анод – электролит», в результате этого пузырьки анодных газов оттесняют электролит, плохая смачиваемость способствует удержанию и слиянию газовых пузырей, что приводит к возникновению сплошной газовой пленки. Сопротивление на границе «анод – электролит» увеличивается, что приводит к росту напряжения на электролизере до 40 В, снижению выхода по току. При анодном эффекте температура электролита может увеличиваться до 1000 °С, что приводит к повышению выпаривания электролита. Введение новой дозы глинозема увеличивает смачиваемость электрода электролитом и приводит к ликвидации анодного эффекта [10]. При АЭ снижается концентрация кислорода в электролите, что приводит к совместному разряду кислородсодержащих ионов с ионами фтора, происходит изменение состава анодных газов. При нормальном технологическом процессе газ состоит из 75 % CO_2 и 25 % CO , при наступлении анодного эффекта CO – 50 %, CO_2 – 25 %, CF_4 – 22,5 %, C_2F_6 – 2,5 %. Фторуглероды имеют низкое значение электропроводности, а также плохо смачиваются расплавом криолита, что приводит к возникновению АЭ.

На рисунке 1.3 – показано образование пузырьков при содержании глинозема в расплаве, близком к 1,5 %.

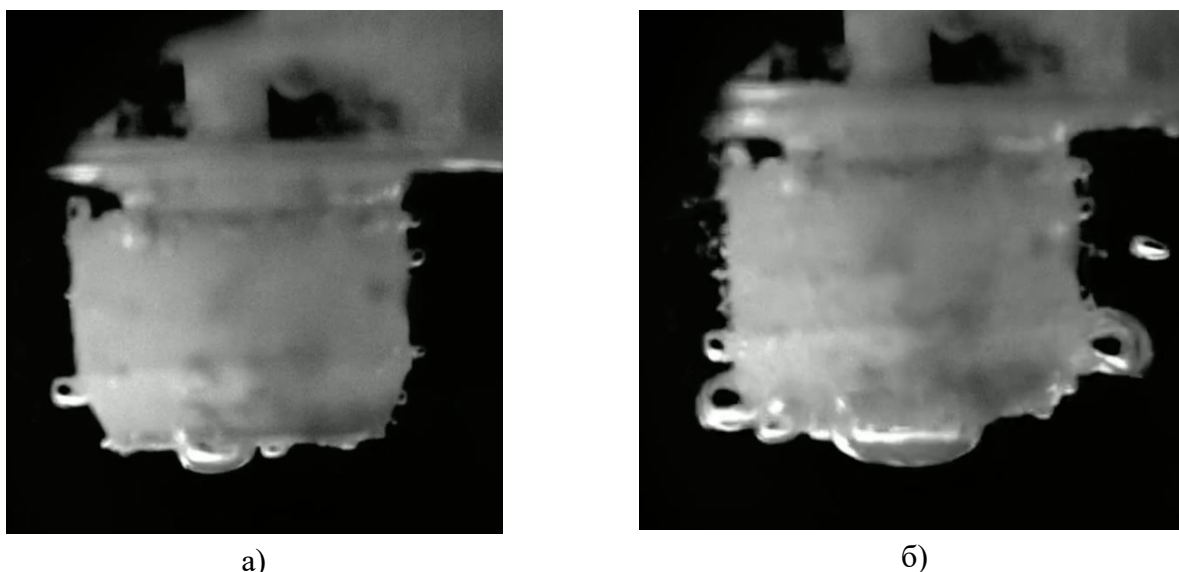


Рисунок 1.3 – Образование пузырьков CO и CO_2 на поверхности анода

(а) – состояние анода перед наступлением АЭ; (б) – активный сход пузырей с подошвы анода при наступлении АЭ. Источник: [114].

В промышленности анодные эффекты используются для ликвидации технологических нарушений на электролизерах типа Содерберга, для корректировки формы рабочего пространства и уменьшения слоя гарнисажа и настыли.

В системе $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{--Al}_2\text{O}_3$ изменение содержания глинозема от 5% до 1% приводит к изменению краевых углов θ смачивания электролитом поверхности угольных электродов. При

уменьшении содержания глинозема краевой угол смачивания увеличивается и при значении угла больше 90° электролит плохо смачивает поверхность электрода, см. рисунок 1.4.

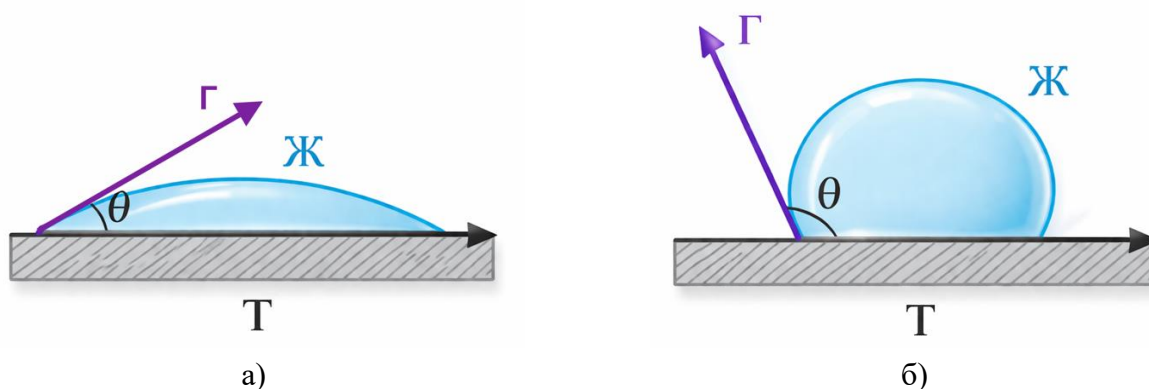


Рисунок 1.4 – Схема сил межфазного натяжения, действующих на границах раздела «газ – твердое», «газ – жидкость», «жидкость – твердое».

а) краевой угол $< 90^\circ$ – жидкость хорошо смачивает твердое тело;

б) краевой угол $> 90^\circ$ – жидкость плохо смачивает твердое тело.

Источник: [19].

Зависимость краевого угла смачивания от концентраций глинозема и фтористого алюминия представлена на рисунках 1.5 и 1.6 соответственно.

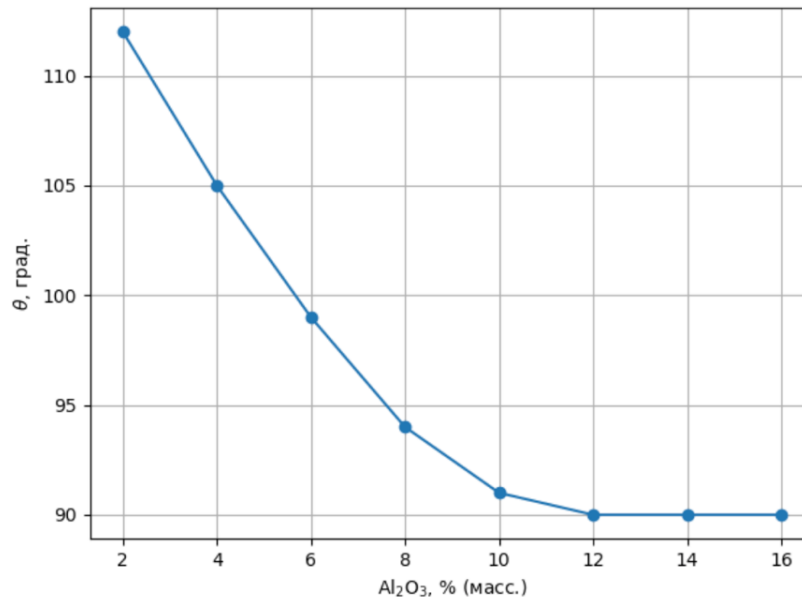


Рисунок 1.5 – Краевой угол смачивания в системе «расплав – графит» в зависимости от концентрации глинозема в расплаве $Na_3AlF_6-Al_2O_3$.

Источник: [19].

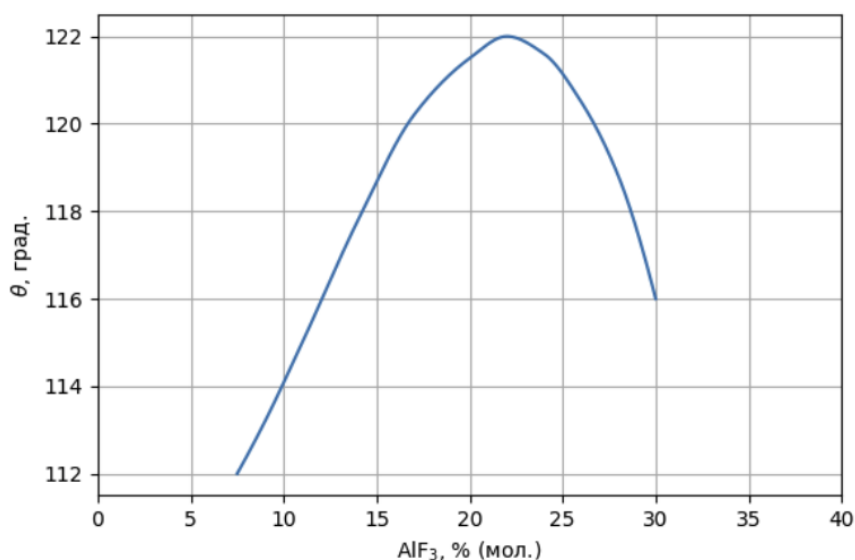


Рисунок 1.6 – Зависимость краевого угла смачивания в системе «расплав – графит» от концентрации фтористого алюминия в расплаве NaF-AlF₃. Источник: [19].

Главной характеристикой производительности электролизера является выход по току (1.12):

$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}} \quad (1.12)$$

где $m_{\text{практ}}$ – количество алюминия, практически полученное за определенное время;

$m_{\text{теор}}$ – теоретическое количество алюминия по закону Фарадея, за такой же интервал времени и при том же значении тока определяется по формуле (1.13):

$$m_{\text{теор}} = \frac{M \cdot I \cdot t_{\text{секунды}}}{n \cdot F} = g_{\text{Al}} \cdot I \cdot t_{\text{часы}} = 0,3356 \cdot I \cdot t_{\text{часы}}, \text{ г} \quad (1.13)$$

где $M = 26,98$ г/моль – молярная масса алюминия;

I – ток, А;

$t_{\text{секунды}}$ – время, с;

$t_{\text{часы}}$ – время, ч;

$n = 3$, число электронов, необходимое для восстановления 1 атома Al;

$F = 96\,485$ Кл/моль – постоянная Фарадея;

$g_{\text{Al}} = 0,3356$ – электрохимический эквивалент алюминия, г/А·ч.

Суточная производительность электролизера вычисляется с учетом выхода по току (1.14):

$$P_{\text{сут}} = I \cdot g_{\text{Al}} \cdot \eta \cdot 24 \cdot 10^{-3}, \text{ кг} \quad (1.14)$$

Характер зависимости выхода по току от различных параметров процесса представлен на рис. 1.7.

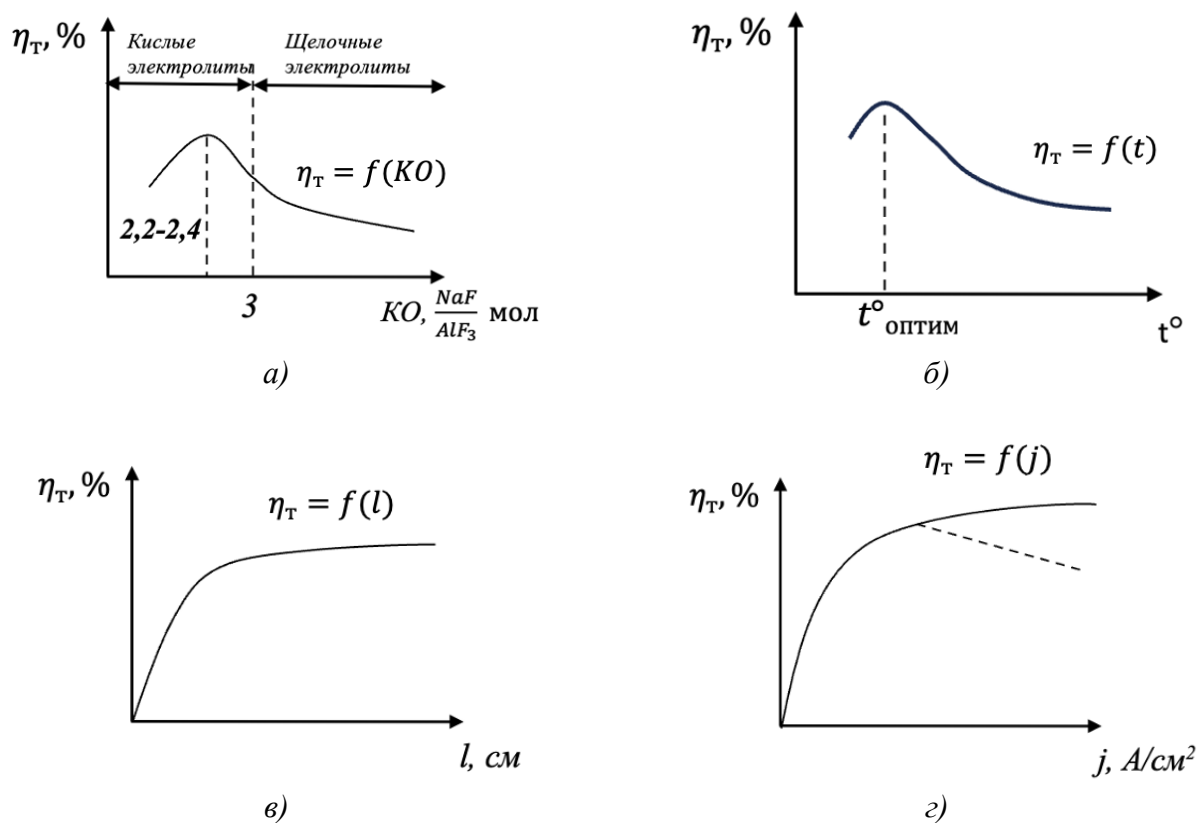


Рисунок 1.7 – Характер зависимости выхода тока от:

а) KO; б) t электролита; в) МПР; г) плотности тока j . Источник: [10]

Как видно из зависимостей, увеличение межполюсного расстояния между анодом и катодом электролизера приводит к увеличению выхода по току из-за снижения потери расплавленного алюминия анодными газами, однако при увеличении МПР наблюдается рост напряжения на электролизере и, как следствие, увеличение расхода электроэнергии. Учитывая магнитную гидродинамику, для каждого типа электролизера определяется оптимальное МПР.

На рисунке 1.8 представлены диаграммы напряжения электролизера в зависимости от технологических параметров процесса.

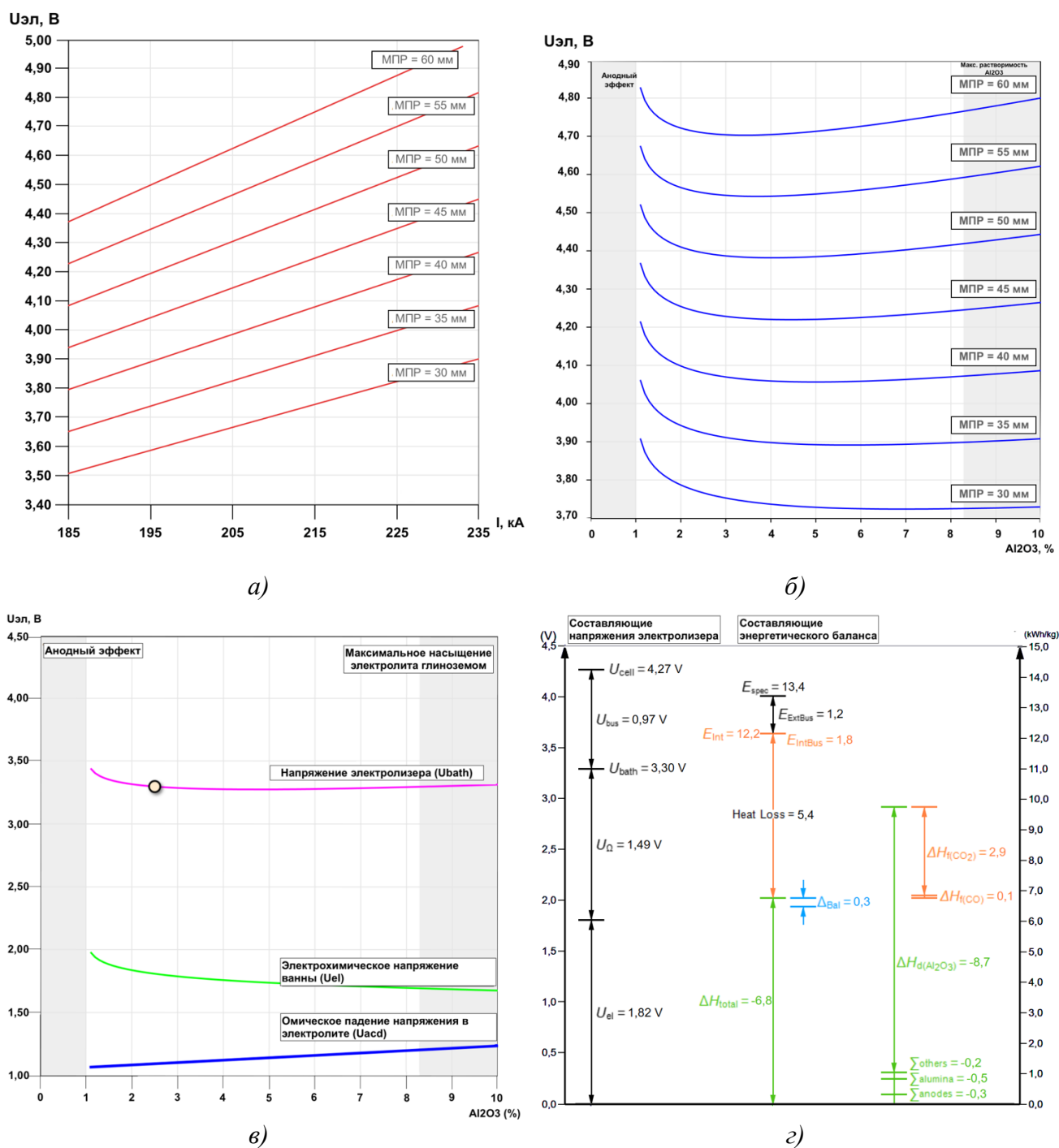


Рисунок 1.8 – Зависимость напряжения электролизной ванны от:

- а) силы тока электролизера при различных МПР, диаграмма справедлива при концентрации $Al_2O_3 = 2,5\%$; б) концентрации Al_2O_3 при различных МПР; в) график зависимости напряжения электролизной ячейки и падения напряжения в МПР от концентрации глинозема; г) график составляющих напряжения ячейки при температуре электролита $960\text{ }^\circ\text{C}$ и концентрации $Al_2O_3 2,5\%$. Источник: рассчитано автором с использованием [48]

Диаграмма на рис. 1.8 – (б) является основой для косвенного определения концентрации Al_2O_3 с помощью системы управления процессом электролиза. Система управления процессом исследует поведение напряжения ванны во времени и на этом основании выводит оценку

содержания глинозема в электролите [48], таким образом управление осуществляется по приращению напряжения.

На рисунке 1.8 – (в) представлен график составляющих напряжений электролизной ванны в зависимости от концентрации глинозема. Напряжение ванны – это сумма омического падения напряжения в электролите и электрохимического напряжения ванны. Поскольку один из компонентов увеличивается, а другой уменьшается с увеличением концентрации оксида алюминия, в результате получается кривая с минимумом. Серые зоны на графике обозначают диапазоны концентрации глинозема, при которых в электролизере возникает анодный эффект или превышает предельная растворимость оксида алюминия.

Выход по току составляет менее 100% из-за потерь металла в электролите и наличия утечек тока (замыкание ошиновки и конструкции электролизера). Механизм потери металла объясняется растворением (в небольшом количестве) расплавленного алюминия в КГР из-за наличия конвекционных потоков, далее металл поднимается на поверхность электролита, окисляется анодными газами по реакции (1.15) [10]:



Расход глинозема определяется в соответствии со следующим соотношением (1.16):



из 1 моль Al_2O_3 (102 г) получается 2 моль Al ($2 \cdot 26,98$ г = 53,96 г), тогда для получения 1 кг алюминия теоретически нужно подать 1,89 кг Al_2O_3 (1.17):

$$m_{Al_2O_3} = \frac{102}{53,96} \cdot m_{Al_теор} \approx 1,89 \cdot m_{Al_теор}, Г \quad (1.17)$$

где $m_{Al_теор}$ – теоретическое количество алюминия по закону Фарадея.

Выход по току увеличивается при увеличении плотности тока. Для электролизеров определяют анодную (1.18), катодную (1.19) и среднюю (1.20) плотности тока:

$$j_{анода} = \frac{I}{S_{анода}}, А/см^2 \quad (1.18)$$

$$j_{катода} = \frac{I}{S_{катода}}, А/см^2 \quad (1.19)$$

$$j_{средняя} = \sqrt{j_{анода} \cdot j_{катода}}, А/см^2 \quad (1.20)$$

где I – сила тока, А;

$S_{анода}$ – площадь сечения анода, см²;

$S_{катода}$ – площадь сечения катода, см².

Количество глинозема, расходуемого в единицу времени определяется выражением (1.21):

$$\Phi_{\text{расх}} = g_{Al} \cdot K_1 \cdot I_{\text{серии}} \cdot \eta \quad (1.21)$$

где g_{Al} – электрохимический эквивалент алюминия, $g_{Al} = 0,000336$ кг/А·ч;

K_1 – стехиометрический коэффициент, равный массе глинозема, расходуемого при получении 1 кг алюминия, $K_1=1,89$;

$I_{\text{серии}}$ – ток серии А;

η – выход по току.

Массовый расход глинозема, подаваемого в электролит $\Phi_{\text{прих}}$, должен быть равен $\Phi_{\text{расх}}$ согласно формулам (1.22) и (1.23):

$$\Phi_{\text{прих}} = \Phi_{\text{расх}} = g_{Al} \cdot K_1 \cdot I_{\text{серии}} \cdot \eta \quad (1.22)$$

$$\Phi_{\text{прих}} = q \cdot n \cdot \nu \quad (1.23)$$

где q – массы дозы глинозема, кг;

n – количества дозирующих устройств, шт;

ν – частота подачи глинозема.

Так как $\Phi_{\text{прих}} = \Phi_{\text{расх}}$, то можно составить уравнение (1.24):

$$g_{Al} \cdot K_1 \cdot I_{\text{серии}} \cdot \eta = q \cdot n \cdot \nu \quad (1.24)$$

Формула (1.25) определена из условия равенства между приходом и расходом глинозема в электролизере. При её соблюдении достигается постоянство содержания глинозема в электролите.

$$q \cdot \nu = \frac{g_{Al} \cdot K_1 \cdot I_{\text{серии}} \cdot \eta}{n} \quad (1.25)$$

Данное выражение дает возможность выбрать величины q и ν . При выборе величины q должны учитываться конструктивные особенности, условия проталкивания и растворения глинозема в электролите, равномерность распределения глинозема, длительность освобождения дозирующего устройства [32].

Выбранная величина q определяет значение ν – частоты ввода глинозема в электролит.

Например, для электролизера РА-300 ОК РУСАЛ, дозатора емкостью $q = 1,75$ кг, тока серии $I_{\text{серии}} = 300\,000$ А, среднего выхода по току 95,2 % и при наличии четырех механизмов питания ($n = 4$) частота подачи глинозема рассчитывается по формуле (1.26) [50]:

$$\nu = \frac{336 \cdot 10^{-6} \cdot 1,94 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 0,952}{4 \cdot 1,75} = 26,595 \quad (1.26)$$

то есть питающее устройство должно сработать примерно 27 раз в час (каждые 133 секунды).

Для автоматического управления режимом питания требуется знать пределы изменения содержания глинозема, а также параметры, необходимые для оценки его измерения во времени.

Содержание глинозема в электролите (по массе) в любой момент времени t_0 определяется выражением (1.27):

$$C_r(t_0) = \frac{Q_{\text{гл}}(t_0)}{Q_{\text{эл}}(t_0)} \cdot 100\% \quad (1.27)$$

где $Q_{\text{эл}}(t_0)$ – количество электролита в электролизере в момент времени t_0 , кг;

$Q_{\text{эл}}(t_0)$ – количество глинозема, растворенного в электролите, в этот же момент времени, кг.

Формула (1.27) справедлива в том случае, если при вводе глинозема в электролит осадка не образуется, содержание глинозема по всему объему электролита одинаково, объем и форма рабочего пространства электролизера постоянны и количество электролита в электролизере с течением времени остается постоянным согласно выражению (1.28) [32], что в действительности требует постоянного контроля уровня электролита и его коррекции в случае уменьшения из-за расхода фторсолей.

$$Q_{\text{эл}}(t_0) = Q_{\text{эл}} = \text{const} \quad (1.28)$$

Содержание глинозема в любой момент времени t определяется формулой (1.29):

$$C_r(t) = \frac{Q_{\text{гл}}(t_0) + Q_{\text{прих}}(t - t_0) - Q_{\text{расх}}(t - t_0)}{Q_{\text{эл}}(t_0)} \cdot 100\% \quad (1.29)$$

где $Q_{\text{прих}}(t - t_0)$ – количество глинозема, введенного в электролит за интервал времени $t - t_0$, кг;

$Q_{\text{расх}}(t - t_0)$ – количество глинозема, разложившегося в процессе электролиза за интервал времени $t - t_0$, кг.

В соответствии с формулой (1.23) получим (1.30):

$$Q_{\text{прих}}(t - t_0) = \int_{t_0}^t \Phi_{\text{прих}}(t) dt = \int_{t_0}^t q \cdot n \cdot \nu dt \quad (1.30)$$

Если $q, n, \nu = \text{const}$, тогда (1.31):

$$Q_{\text{прих}}(t - t_0) = q \cdot n \cdot N(t - t_0) = q \cdot n \cdot \frac{t - t_0}{T} \quad (1.31)$$

где $N(t - t_0)$ – число срабатываний питающих механизмов электролизера за промежуток времени $t - t_0$;

T – промежуток времени между двумя последовательными срабатываниями питающих механизмов электролизеров, $T=1/\nu$.

Количество глинозема, разложившегося в процессе электролиза за промежуток времени $(t - t_0)$, определяется по формуле (1.32):

$$Q_{\text{расх}}(t - t_0) = g_{Al} \cdot K_1 \int_{t_0}^t I_{\text{серии}} \cdot \eta dt \quad (1.32)$$

Если $I_{\text{серии}}, \eta = \text{const}$, то (1.33):

$$Q_{\text{расх}}(t - t_0) = g_{Al} \cdot K_1 \cdot I_{\text{серии}} \cdot \eta(t - t_0) \quad (1.33)$$

Подставив формулы (1.28), (1.30), (1.32) в (1.29) получаем формулу (1.34):

$$C_{\Gamma}(t) = \frac{Q_{\text{гл}}(t_0) + \int_{t_0}^t q \cdot n \cdot v dt - g_{Al} \cdot K_1 \int_{t_0}^t I_{\text{серии}} \cdot \eta dt}{Q_{\text{эл}}(t_0)} \cdot 100\% \quad (1.34)$$

Принимая во внимание (1.27), содержание глинозема в любой момент времени t определяется формулой (1.35) [32]:

$$C_{\Gamma}(t) = C_{\Gamma}(t_0) + \frac{100}{Q_{\text{эл}}(t_0)} \int_{t_0}^t (q \cdot n \cdot v - g_{Al} \cdot K_1 \cdot I_{\text{серии}} \cdot \eta) dt \quad (1.35)$$

Большое количество глиноземного осадка на подине электролизера приводит к увеличению электрического сопротивления подины, ее локальному перегреву. Около 30% составляющих падений напряжения в катодe приходится на криолито-глиноземный осадок. Следствием этого является повышение расхода электроэнергии, а также снижение выхода по току. Следовательно, большое внимание при питании электролизной ванны должно быть уделено эффективности растворения глинозема и алгоритмам питания.

Объем для растворения порции глинозема определяется уровнем электролита. Для эффективного растворения глинозема до достижения границы расплавленного металла следует стабилизировать уровень электролита, оптимальное значение уровня для отечественного электролизера РА-300 составляет 19 – 20 см.

Глубина шахты на отечественных электролизерах составляет: от 450 – 650 мм. Глубина шахты $H_{\text{шахты}}$ складывается из высоты слоя металла $h_{\text{мет}}$, слоя электролита $h_{\text{электр}}$, толщины слоя криолито-глиноземной корки с укрывным материалом $h_{\text{корки}}$. Для высокоомощных отечественных электролизеров (300 кА и более) высота шахты электролизера рассчитывается по формуле (1.36) [35]:

$$H_{\text{шахты}} = h_{\text{мет}} + h_{\text{электр}} + h_{\text{корки}} = 350 + 170 + 80 = 600 \quad (1.36)$$

Расход электроэнергии на производство 1 тонны алюминия определяется по формуле (1.37):

$$W = \frac{U_{\text{ср}}}{g_{Al} \cdot \eta} \cdot 10^3, \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (1.37)$$

где $U_{\text{ср}}$ – среднее напряжение на электролизере, В.

При расчете электрического баланса электролизера выделяют среднее ($U_{\text{ср}}$), греющее ($U_{\text{гр}}$) и рабочее ($U_{\text{раб}}$) напряжения электролизера, рассчитываются по формулам (1.38), (1.39) (1.40) [6, 35].

Среднее напряжение $U_{\text{ср}}$ – включает в себя все виды падения напряжения, в том числе среднее повышение напряжения от анодных эффектов и падение напряжения в общесерийной ошиновке, характеризует средний расход электроэнергии на производство алюминия, определяют счетчиком вольт – часов [6].

Рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$ – напряжение, определяемое при помощи вольтметра на электролизере, т.е. среднее напряжение без учета падения напряжения в общесерийной ошиновке и среднего повышения напряжения от анодных эффектов. Характеризует технологический режим электролиза в стационарном режиме, т.е. при отсутствии на нем выливки металла, перетяжки анодной рамы, обработки и анодного эффекта. Измеряется вольтметром, установленным на ванне [6].

Греющее напряжение $U_{\text{гр}}$ – учитывает падение напряжения во всех греющих элементах электролизера, т.е. находящихся внутри того объема, с поверхности которого рассчитываются потери в окружающее пространство, включая напряжение поляризации. $U_{\text{гр}}$ используется при расчете теплового баланса, измерить непосредственно невозможно [6].

$$U_{\text{ср}} = E + \Delta U_{\text{электролит}} + \Delta U_{\text{а}} + \Delta U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{ош}} + \Delta U_{\text{АЭ}} + \Delta U_{\text{с}} \quad (1.38)$$

$$U_{\text{р}} = E + \Delta U_{\text{электролит}} + \Delta U_{\text{а}} + \Delta U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{ош}} \quad (1.39)$$

$$U_{\text{гр}} = E + \Delta U_{\text{электролит}} + \Delta U_{\text{а}} + \Delta U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{АЭ}} \quad (1.40)$$

где E – напряжение поляризации, В;

$\Delta U_{\text{электролит}}$ – падение напряжения в электролите, В;

$\Delta U_{\text{а}}$ – падение напряжения в аноде, В;

$\Delta U_{\text{к}}$ – падение напряжения в катоде, В;

$\Delta U_{\text{ош}}$ – падение напряжения в ошиновке электролизера, В;

$\Delta U_{\text{АЭ}}$ – повышение падения напряжения за счет анодных эффектов, В.

$\Delta U_{\text{с}}$ – падение напряжения в общесерийной ошиновке, В.

Напряжение поляризации E (ЭДС поляризации) представляет собой термодинамическую величину напряжения разложения для реакции разложения глинозема с образованием CO_2 , плюс анодные и катодные перенапряжения, минус деполяризация, вызванная растворением в электролите алюминия в виде субфторидов натрия и алюминия [6].

Т.к. катодное перенапряжение и деполяризация в промышленных условиях практически отсутствуют, все перенапряжение определяется процессом на аноде. Расчет напряжения поляризации (ЭДС поляризации) осуществляется согласно эмпирическому уравнению (1.41) [6]:

$$E = A + 0,37 \cdot j_{\text{анода}} \quad (1.41)$$

где $j_{\text{анода}}$ – анодная плотность тока, А/см²;

A – коэффициент, для электролизеров с ОА = 1,33.

Для расчета падения напряжения в электролите используется формула Форсблом-Машовца (1.42) [30]:

$$\Delta U_{\text{электролит}} = I \cdot \rho_{\text{эл}} \cdot \frac{l_{\text{МПР}}}{(S_a + P_a \cdot (1 + 2,5))} \quad (1.42)$$

где $\rho_{\text{эл}}$ – удельное электросопротивление электролита, для кислых электролитов 0,56 Ом·см;

$l_{\text{МПР}}$ – МПР, см;

S_a – площадь анодного массива, см²;

P_a – периметр анода, см².

Падение напряжения в обожженном аноде определяется по формуле (1.43):

$$\Delta U_a = \Delta U_{\text{уг}} + \Delta U_{\text{анод-ниппель}} + \Delta U_{\text{ниппель}} + \Delta U_{\text{н-ш}} \quad (1.43)$$

где $\Delta U_{\text{уг}}$ – падение напряжения в угольной части анода, В;

$\Delta U_{\text{анод-ниппель}}$ – падение напряжения в контакте анод-ниппель, В;

$\Delta U_{\text{ниппель}}$ – падение напряжения в ниппеле, В;

$\Delta U_{\text{н-ш}}$ – падение напряжения на участке ниппель-кронштейн-штанга-анодная шина, принимается равным 0,05 В.

Падение напряжения в угольной части анода рассчитывается по уравнению (1.44):

$$\Delta U_{\text{уг}} = \rho_a \cdot \phi \cdot l_{\text{ср}} \cdot \frac{I}{S_{\text{анодов}}} = 0,007 \cdot (1 - 0,00025 \cdot T_{\text{анода}}) \cdot \phi \cdot l_{\text{ср}} \cdot \frac{I}{S_{\text{анодов}}} \quad (1.44)$$

где ϕ – форм-фактор электрического поля анода;

ρ_a – удельное электросопротивление угольного анода, Ом·см;

$l_{\text{ср}}$ – среднее расстояние от дна ниппельного гнезда до подошвы анода, см;

$T_{\text{анода}}$ – температура анода, для электролизеров с ОА = 640 °С;

$S_{\text{анодов}}$ – общая площадь анодов, см².

Форм-фактор определяется в соответствии с уравнением (1.45) [35]:

$$\phi = 1 + 0,142 \cdot \frac{a \cdot x \cdot b}{F_{\text{нг}} \cdot (l_{\text{ср}} + \Delta l)} = 1 + 0,142 \cdot \frac{a \cdot x \cdot b}{F_{\text{нг}} \cdot \left(l_{\text{ср}} + \frac{h_{\text{нг}}}{2} \cdot \frac{F_{\text{бок.н.г.}}}{F_{\text{нг}}} \right)} \quad (1.45)$$

где $a \cdot x \cdot b$ – площадь подошвы анодного блока, см²;

$F_{\text{нг}}$ – площадь поверхности ниппельного гнезда, см²;

$F_{\text{бок.н.г.}}$ – площадь боковой поверхности ниппельного гнезда, см²;

$h_{\text{нг}}$ – глубина ниппельного гнезда, см²;

$l_{\text{ср}}$ = (расстояние от дна ниппельного гнезда до подошвы нового анода + расстояние до подошвы огарка) / 2, см;

$h_{\text{нг}}$ – глубина ниппельного гнезда, см.

Падение напряжения в контакте анод-ниппель вычисляется по формуле (1.46):

$$\Delta U_{\text{анод-ниппель}} = I \cdot \frac{\rho_1}{n_k} \cdot F_{\text{нг}} \cdot n_a \quad (1.46)$$

где ρ_1 – удельное электросопротивление контакта, 0,05 Ом·см;

n_k – количество ниппелей, шт;

n_a – количество анодных блоков, шт.

Падение напряжения в ниппеле вычисляется по формуле (1.47):

$$\Delta U_{\text{ниппель}} = I \cdot \rho_2 \cdot \frac{l}{n_k} \cdot S \quad (1.47)$$

где ρ_2 – удельное электросопротивление ниппеля, $68 \cdot 10^{-6}$ Ом·см;

l – длина запечённой части ниппеля, см;

S – сечение ниппеля, см²;

n_k – количество ниппелей, шт.

Падение напряжения в катоде вычисляется по уравнению (1.48):

$$\Delta U_k = \left(0,96 + \frac{2,14 \cdot b_{\text{ш}} + 140}{B_{\text{ш}}} \right) \cdot \frac{I}{L_a} \cdot 10^{-3} \cdot 1,098 \quad (1.48)$$

где $b_{\text{ш}}$ – расстояние от анода до боковой футеровки, см;

$B_{\text{ш}}$ – внутренняя ширина шахты, см;

L_a – общая длина анодного массива, см.

Повышение падения напряжения за счет анодных эффектов можно рассчитать по уравнению (1.49):

$$\Delta U_{\text{АЭ}} = (U_{\text{АЭ}} - U_p) \cdot t_{\text{АЭ}} \cdot \frac{k}{60 \cdot 24} = 25 \cdot 2 \cdot \frac{1}{60 \cdot 24} = 0,0347 \text{ В} \quad (1.49)$$

где $(U_{\text{АЭ}} - U_p)$ – превышение напряжения на электролизере во время АЭ, для большинства случаев 25 В;

$U_{\text{АЭ}}$ – среднее напряжение анодного эффекта, В;

U_p – рабочее напряжение, В;

$t_{\text{АЭ}}$ – время АЭ, при расчете для отечественных электролизеров принимают 2 мин;

k – количество анодных эффектов на один электролизер в сутки, шт;

$k = 1$.

Падение напряжения в ошиновке электролизера вычисляется по формуле (1.50):

$$\Delta U_{\text{ош}} = \rho \cdot l \cdot j_{\text{ош}} = \frac{\rho \cdot l \cdot I}{S} \quad (1.50)$$

где ρ – удельное электросопротивление шины, Ом · см;

l – длина участка шинпровода, см;

$j_{\text{ош}}$ – плотность тока в ошиновке, А/см²;

I – сила тока, А;

S – среднее сечение контакта, см².

Тепловой баланс электролизера определяется следующим выражением (1.51):

$$Q_{\text{эл}} + Q_{\text{анода}} = Q_{\text{разложения}} + Q_{\text{металла}} + Q_{\text{газа}} + Q_{\text{потерь}}, \text{ кДж/ч} \quad (1.51)$$

где $Q_{\text{эл}}$ – приход тепла от электрической энергии;

$Q_{\text{анода}}$ – приход тепла от сгорания анода;

$Q_{\text{разложения}}$ – расход тепла на разложение глинозема;

$Q_{\text{металла}}$ – унос тепла с вылитым металлом;

$Q_{\text{газа}}$ – унос тепла с отходящими газами;

$Q_{\text{потерь}}$ – потери тепла в окружающее пространство конструктивными элементами электролизера.

Тепловой баланс электролизера в основном определяется уровнем металла, в процессе электролиза допускается отклонение температуры не более чем на 10 °С [66].

Устойчивость теплового и технологического состояния электролизера определяется выделением греющей мощности от прохождения электрического тока (1.52):

$$Q_{\text{эл}} = 0,86 \cdot I \cdot U_{\text{гр}} \quad (1.52)$$

где 0,86 – тепловой эквивалент;

I – сила тока, А;

$U_{\text{гр}}$ – греющее напряжение электролизера, В.

В настоящее время оптимальное тепловое и технологическое состояние электролизера поддерживают по приведенному напряжению (1.53) [46]:

$$U_{\text{пр}} = (U_{\text{раб}} - E_0) \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{серии}}} + E_0 \quad (1.53)$$

где $U_{\text{раб}}$ – рабочее напряжение электролизера, В;

E_0 – обратная ЭДС;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток, А;

$I_{\text{серии}}$ – ток серии, А.

Расчет приведенного напряжения предназначен для стабилизации $U_{\text{мпр}}$ от изменения обратной ЭДС E_0 и тока серии $I_{\text{серии}}$ при периодическом регулировании электролизера, когда E_0 имеет наиболее вероятное среднее значение 1,55 В [46].

Для ведения непрерывного процесса электролиза КГР требуется следить за основными технологическими параметрами, осуществлять периодическую подачу глинозема и фтористых солей в расплав электролита, производить замену отработанных угольных анодов, а также отбирать жидкий алюминий, оседающий на дне электролизной ванны.

Для периодической подачи глинозема и фтористых солей в конструкции электролизеров используется АПГ, а для разрушения образующейся корки на поверхности КГР применяется пробойное устройство, также являющееся частью системы автоматической подачи глинозема.

Контроль формы рабочего пространства электролизной ванны позволяет увеличить срок службы бортовой футеровки электролизера, а также поддерживать выход по току на постоянном значении. Гарнисаж и настыль представляют собой застывший электролит и надежно защищают бортовую футеровку от разрушения в районе металл – электролит. Следить за толщиной настыли также необходимо и для контроля распределением тока в расплаве от анода к катоду. Выделяют три режима распределения тока в расплаве (рисунок 1.9):

- 1) нормальный ход – горизонтальная составляющая тока в металле незначительна, ток распределяется перпендикулярно от анода к катоду;
- 2) горячий ход – возникает при разрушении настыли, характеризуется увеличением горизонтальной составляющей тока от анода к бортам электролизера;
- 3) холодный ход – характеризуется чрезмерным зарастанием подины электролизера настылями, которые заходят под анод. Вследствие этого изменяется распределение тока в расплаве, а также магнитное поле, что приводит к возрастанию циркуляции расплавленного алюминия.

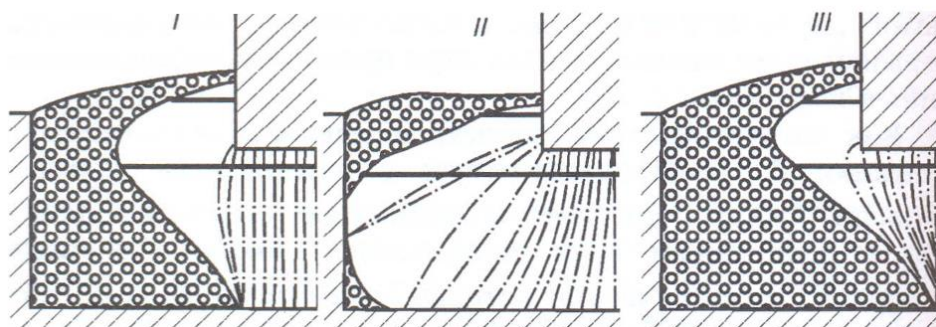


Рисунок 1.9 – Схема распределения тока в расплаве при различной форме рабочего пространства электролизной ванны. I – нормальный режим, II – горячий ход, III – холодный ход. Источник: [8]

Таким образом форма рабочего пространства является важным технологическим параметров электролиза КГР, который необходимо контролировать. Данная процедура выполняется рабочим персоналом электролизного цеха ручным инструментом (металлическим крючком).

1.2 Становление и развитие алюминиевой промышленности в мире и в России

Развитие цветной металлургии, требующей мощных источников электроэнергии, стало возможным после изобретения в 1870 г. динамоэлектрической машины и открытия в 1889 г. электрического трехфазного тока для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Впервые алюминий в чистом виде получен в 1825 году датским физиком Эрстедом химическим путем – вытеснением алюминия из криолита Na_3AlF_6 натрием и магнием [2, 16]. Однако промышленники, такие как Альфред Пешине (руководитель французской металлургической компании PCAC), первоначально не видели возможности широкого применения чистого алюминия, главным образом из-за его высокой стоимости производства химическим методом, поэтому производили алюминиевую бронзу. Чистый алюминий использовался только для декоративных целей, алюминиевая бронза с содержанием алюминия от 5 % до 20 % массово применялась в изделиях, где требовалась повышенная коррозионная стойкость, как альтернатива железу [76]. Для производства алюминиевой бронзы не использовался криолит, глинозем подвергался разложению на поверхности расплавленной меди.

Большой вклад в развитие технологии производства алюминиевой бронзы внесли братья Коулз, основавшие компанию Cowles Syndicate Company и открывшие завод в Англии. «Коулз использовали электродуговые печи для восстановления оксида алюминия, находящегося в смеси с углеродом и медью. Алюминий образовывал сплав с медью при высокой температуре электрической дуги между углеродными электродами» [16]. Появляются крупные компании, производящие алюминиевую бронзу и алюминий по натрийтермическому способу, такие как SMG (Schweizerische Metallurgische Gesellschaft, Швейцария), Alliance Aluminium (Англия), Pittsburgh Reduction Company (компания являлась предшественником крупнейшей металлургической компании США Alcoa – Aluminum Company of America), AEG (Германия), французские компании PCAC (Pechiney), SIAAM и SEMF [16].

Мировая алюминиевая промышленность зародилась в 1886 году, когда французский химик Поль Эру и американский инженер – химик Чарльз Холл и запатентовали способ электролиза глинозема, растворенного в расплавленном криолите и восстановление алюминия на катоде, что послужило началом развитию крупной области электрометаллургии. Катодом являлся графитовый тигель, а в роли анода выступал углеродный цилиндрический анод, помещенный в центр тигля. Температура поддерживалась при помощи внешнего обогрева. Поль Эру получил французский патент №175711 на «Электролитический процесс для производства алюминия» (Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium) 1 сентября 1886 (приоритет 23.04.1886) [42, 76, 84, 116], см. рисунок 1.10, а Чарльз Холл получил патент США №400664 на «Способ восстановления алюминия из его фтористых солей электролизом» (Process of Reducing Aluminium from its Fluoride Salts by Electrolysis) 2 апреля 1889 года

(приоритет от 09.07.1886 года) [43] см. рисунок 1.11. Судьбы Чарльза Холла и Поля Эру также удивительны тем, что они родились в 1863 году и умерли в 1914 году. В отличие от своего конкурента Поль Эру уделял большое внимание международному применению своих патентов, т.е. регистрировал патенты на производство алюминия и алюминиевой бронзы во Франции, США, Бельгии, Англии, Испании, Германии, Канаде с целью получения прибыли от продажи лицензий, а также обладал не только качествами изобретателя, но и предпринимателя, принимал активное участие в руководстве и развитии компаний SMG (Швейцария) и SEMF (Франция) [76].

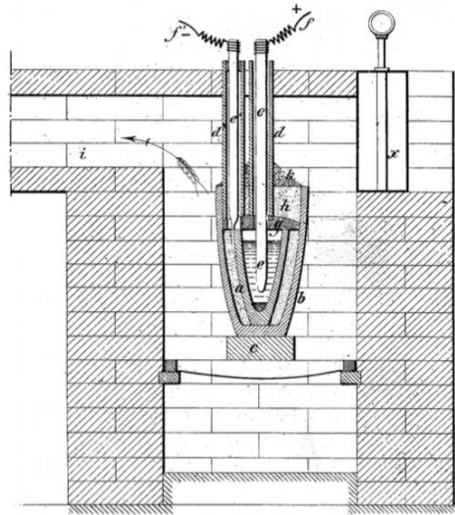


Рисунок 1.10 – Чертеж конструкции тигля и электролизной ячейки из патента Поль Эру, французский патент №175711 Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium, 1 сентября 1886. Источник: [42]

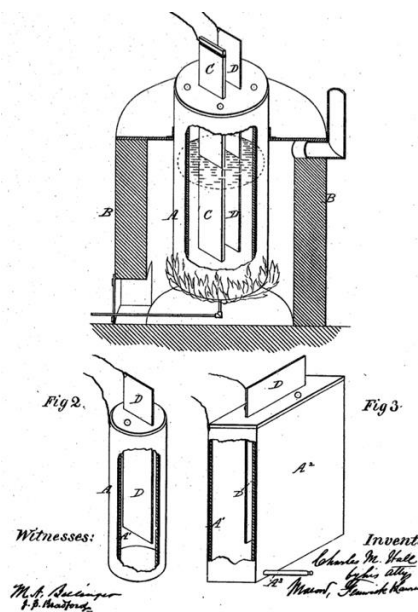


Рисунок 1.11 – Чертеж конструкции электролизной ячейки Чарльза Холла с вертикальными электродами для электролитического производства алюминия, патент США № 400664 Process of reducing aluminium from its fluoride salts by electrolysis, 2 апреля 1889 . Источник: [43]

«Патенты Эру и Холла были идентичными и сделаны почти одновременно. Без судебного разбирательства установилась практика (видимо, по взаимному согласию), по которой патент Эру применялся в Европе, а Холла – в США и Канаде» [50].

При воздействии постоянного тока при электролизе КГР происходит не только электрохимическое разложение глинозема, но и выделение джоулева тепла, которое используется для поддержания температуры электролита 960 – 970 °С. С увеличением мощности электролизеров теряется потребность во внешнем обогреве. Именно это позволило убрать из начальной конструкции электролизера внешние источники тепла.

В 1888 году химик Мартин Килиани, работавший на испытательном заводе в Берлине, начинает сотрудничать с Поль Эру для разработки новой электролизной установки, предназначенной для получения чистого алюминия в промышленных масштабах. Килиани предлагает добавлять в электролит синтетический криолит, в итоге состав нового электролита отличался повышенным содержанием AlF_3 , что привело к снижению температуры плавления и увеличению производительности электролизера [16]. При снижении концентрации Al_2O_3 в электролизере происходит анодный эффект, наблюдаются скопление газов под подошвой анода и резкий скачок напряжения. Для питания ванны Al_2O_3 приходится разрушать корку.

Компания «Pittsburgh Reduction Company» занималась работами по внедрению технологии Холла в промышленных масштабах и в 1888 году разработала электролизную ванну с горизонтальным расположением электродов. С тех пор именно такая конструкция электролизной ванны с использованием жидкого алюминия в качестве катода и горизонтальным расположением электродов стала промышленным стандартом.

В 1892 году под руководством Поль Эру компания SEMF строит завод по производству чистого алюминия в Фрогсе (Франция). Завод насчитывал 10 электролизеров с силой тока 4 кА, напряжением 5,5 В. В последующем с увеличением мощности электрической станции производительность завода составляла 200 – 300 кг алюминия в сутки. Рост продаж алюминия стимулирует компанию на строительство новых заводов с большей мощностью в Ла Празе [16]. Для нового завода Поль Эру разрабатывает электролизер, ставший стандартом для алюминиевой промышленности.

В 1885 году А.А. Нововейский основал первый в России завод по производству алюминия в г. Загорск (Московская область). Алюминий выплавляли по химическим способом по методу «Сен Клер Дэвилля и Розе», однако стоимость отечественного алюминия была выше на 5 руб/кг относительно зарубежного и завод не выдержал конкуренции и был закрыт спустя два года после открытия [16, 23].

Значительный вклад в снижение стоимости производства алюминия внес австрийский химик Карл Йозеф Байер, разработавший в 1889 году на Тентелевском химическом заводе в

Санкт-Петербурге [16, 23] способ получения глинозема из бокситов, заключавшийся в обработке бокситов щелочными растворами в автоклавах с последующим разложением алюминатного раствора на гидроксид алюминия и оборотный щелочной раствор [2]. Данный способ получения глинозема до сих пор является основным в мире. Царское правительство предпочитало покупать алюминий за рубежом за огромные суммы, оплачивая чистым золотом. К.Й. Байер, получив отказ в реализации своего проекта, уехал во Францию, где фирма «АФК» поставила по его способу глиноземный завод, а К.Й. Байер стал директором нового предприятия. Но с тех пор технология производства оксида алюминия по Байеру была законспирирована и вплоть до пуска Уральского алюминиевого завода в 1939 г. гидрощелочной метод переработки низкокремнистых бокситов назывался в России «секрет Байера» [63]. В работе 1923 года «К вопросам создания в России алюминиевого производства» профессора А.П. Курдюмова способу Байера отводилось всего лишь сорок строк. В расшифровке способа Байера участвовали Л.А. Бугарев (организатор и руководитель работ по исследованию и внедрению способа производства глинозема из уральских бокситов, занимался организацией проектирования и научно-исследовательскими работами УАЗа, в последствии первый главный инженер УАЗа, а затем директор Новокузнецкого алюминиевого завода), профессор Ф.Ф. Вольф, доцент Уральского химико-технологического института В.С. Чемоданов, а также студенты Чупраков, Крочевский, Варламов, А.А. Евтютов [28].

Одним из первых отечественных ученых, внесших вклад в развитие электролитического производства алюминия, стал профессор Павел Павлович Федотьев (заведующий кафедрой технической электрохимии в Петербургском политехническом институте в начале 20 века) [29]. П.П. Федотьев совместно со своими учениками изучили системы $\text{NaF} - \text{AlF}_3$ и $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$, построили диаграммы их плавкости, исследовали солевые добавки для снижения температуры плавления электролита, анодный эффект, растворимость алюминия в электролите, глинозема в криолитовых расплавах в зависимости от добавок NaF , CaF_2 и AlF_3 , установили зависимость потерь металла от состава электролита, причины образования карбида алюминия, влияние криолитового расплава на углеродистый материал [5, 29]. Авторы исследования определили, что непрерывное выделение алюминия начинается при напряжении 2,1 В, а также провели исследования по выбору наиболее оптимального состава электролита. Несмотря на то, что к моменту опубликования Федотьевым П.П., Ильинским В.П. экспериментальных исследований по электрометаллургии алюминия электролитическое получение алюминия существовало 25 лет, а в 9 странах работали алюминиевые заводы, теория электрометаллургии алюминия оставалась почти неразработанной [29]. Авторами работы были заложены основы науки об электрометаллургии алюминия. Именно под руководством П.П. Федотьева в 1929 году на

опытной установке на заводе «Красный Выборжец» из отечественных сырьевых материалов были получены первые килограммы алюминия [5, 27].

Дореволюционная Россия не имела собственных производственных мощностей для производства алюминия, и фактически отечественная алюминиевая промышленность началась с утверждения ГОЭЛРО (государственный план электрификации России), данное решение было необходимым для энергоёмкой алюминиевой промышленности. Благодаря этому в России появилась первая гидроэлектростанция на реке Волхов, что в последующем приведет к строительству Волховского алюминиевого завода и его запуску в мае 1932 года [27], в 1930 году главным инженером которого являлся Ю.В. Баймаков, ученик П.П. Федотьева, а после возглавлявший проектирование ряда алюминиевых заводов [5]. В последующем уже ученики Баймакова, среди которых М.М. Ветюков, А.А. Костюков, занимались исследованиями снижения расхода анода, определению оптимального состава электролита с целью сокращения расходов электроэнергии, фтористых солей, вредных выделений в цех, улучшениями технико-экономических показателей производства алюминия [5]. Исследованиями электромагнитных явлений в электролизере занимался А.М. Цыплаков, данная проблема особо остро проявилась на мощных электролизерах с верхним токоподводом, при двухрядном расположении ванн магнитное поле влияло на перекося металла. Для решения проблемы была разработана двухсторонняя асимметричная ошиновка [5].

Огромный вклад в становлении и развитии отечественной алюминиевой промышленности внесли ученые Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (ВАМИ), созданного в 1931 году [27]. По научно-техническим проектам института построен 21 алюминиевый завод, в том числе крупнейшие в мире: Братский, Красноярский, Саяногорский. До образования института научные исследования в области производства алюминия выполнялись Ленинградским горным и Ленинградским политехническим институтами, а также Государственным институтом прикладной химии (ГИПХ). Для выполнения больших объемов проектных работ в 1940 году из состава ВАМИ в самостоятельный институт выделен «Гипроалюминий» [27].

С приходом в Германии к власти фашистов в 1933 году мир охватила «Алюминиевая лихорадка». Страны начали усиленную подготовку к войне. В научном журнале «Легкие металлы» в 1935 году (выпуск №6) были опубликованы данные объема выпуска алюминия по странам. В частности отмечалось, что в 1934 году Германия увеличила выпуск алюминия в 2 раза, а Япония и другие империалистические государства увеличивают закупки готового металла из других стран [63].

В военные годы (1941 – 1945 гг.) Волховский, Днепровский алюминиевые и Тихвинский глиноземный заводы были остановлены и эвакуированы на Урал и в Сибирь. Ударными темпами

достраивались Уральский алюминиевый завод (первая плавка алюминия 5 сентября 1939 года), сыгравший огромную роль в производстве алюминия для авиационной промышленности, начато строительство Новокузнецкого и Богословского алюминиевых заводов (первый алюминий получен в 1943 году и 9 мая 1945 соответственно). Особо остро на Уральском алюминиевом заводе стояла проблема нехватки глинозема собственного производства, четверть мощностей электролизного цеха простаивала (7 и 8 электролизные корпуса). Для решения проблемы Государственный Комитет Обороны выпустил постановление с указанием построить второй глиноземный цех за 4 месяца (конец апреля 1942 – сентябрь 1942 года). Строительство курировал лично нарком Цветной металлургии СССР Ломако Петро Фадеевич. Под руководством директора завода Славского Ефима Павловича (1941 – 1945 гг.) и главного химика завода Евтютова Анатолия Акиндиновича второй глиноземный цех был запущен вовремя [63]. Для производства глинозема разработали комбинированную переработку бедных по содержанию соколовских бокситов и богатых с Североуральского бокситового рудника. В 90-х годах завод перейдет на Тиманские бокситы. Именно на УАЗе благодаря инженерам завода, институтам ВАМИ и Цветметавтоматика впервые в отечественной металлургии были внедрены автоматические системы управления (регулирование положения анода и подача глинозема) [63].

Послевоенные годы ознаменовались восстановлением Волховского и Днепровского алюминиевых заводов, а к началу 60-х годов запущены Канакерский (Армения), Кандалакшский, Надвоицкий, Сумгаитский (Азербайджан) и Волгоградский алюминиевые заводы. Совместными усилиями ВАМИ и «Гипроалюминия» в 1954 году построен Скавинский алюминиевый завод (г. Скавина, Польша). Заводы, построенные в первые два десятилетия после войны, имели небольшую мощность из-за недостаточно развитой электроэнергетики и по этой причине не удовлетворяли требованиям быстро растущей промышленности.

В 1966 г. Председателем Совета Министров СССР А.Н. Косыгиным была поставлена задача ускорения развития металлургии легких металлов [27] и выделены значительные средства. Для эффективной реализации поставленной цели произошло объединение ВАМИ и «Гипроалюминий», на работу в ВАМИ взяты опытные специалисты из промышленности во главе с Калужским Н.А. (директор института с 1966 по 1993 гг. [27]). Специалистами института выработаны основные направления развития для алюминиевой промышленности: увеличение единичной мощности технологических агрегатов, комплексная переработка технологического сырья, комплексная механизация и автоматизация производства, увеличение производительности труда, создание и освоение экологически безопасных технологических процессов, повышение качества и увеличение количества номенклатуры выпускаемой продукции.

Наращивание производственных мощностей потребовало увеличение производства глинозема. По проектам ВАМИ в СССР было построено 9 глиноземных заводов, а недостаток запасов высококачественных бокситов привел к необходимости увеличения многообразия используемого алюминиевого сырья и методов его переработки. Специалисты ВАМИ разработали и внедрили способ спекания бокситов с известняком и содой (применен на Волховском алюминиевом и Бокситогорском глиноземном заводах), параллельно-комбинированный способ производства глинозема Байер-спекание для Уральского и Богословского алюминиевого заводов, технологии комплексной переработки нефелиновых концентратов на глинозем, соду, поташ (карбонат калия), портландцемент (применен на Пикалевском глиноземном комбинате), а также комплексной переработки алунитов на глинозем, серную кислоту, сульфат калия для Кировабадского глиноземного завода в Азербайджане. Последовательно-комбинированный способ Байер-спекания применен на Павлодарском алюминиевом заводе в Казахстане для производства глинозема из высокожелезистых низкокачественных бокситов [27].

Последним алюминиевым заводом, запущенным в СССР, стал Саяногорский алюминиевый завод (1985 год). Большое число построенных алюминиевых заводов обеспечило СССР первое место в мире по выпуску алюминия в середине 80-х годов [52].

Распад Советского Союза и приватизация предприятий в 1990-х послужили причиной перехода алюминиевой промышленности в частную собственность. Группа компаний «Ренова» во главе с Вексельбергом В.Ф. регистрирует в 1996 году «Сибирско-Уральскую Алюминиевую компанию». В состав «СУАЛа» входили Богословский, Иркутский, Кандалакшский, Надвоицкий, Уральский, Волховский, Волгоградский алюминиевые и Пикалёвский глинозёмный заводы. В 1997 году создается компания «Сибирский алюминий» («Сибал» во главе с Дерипаской О.В.), в 2000 году происходит объединение её активов с инвестиционной компанией Millhouse Capital UK Ltd (принадлежащей Абрамовичу Р.А.) и создание компании «Русский алюминий» («РУСАЛ»), владеющей Саяногорским, Красноярским, Братским, Новокузнецким, Хакасским алюминиевыми заводами. В 2003 году в состав РУСАЛа также вошел Всероссийский алюминиево-магний институт (ВАМИ). В результате слияния в 2007 году компаний «РУСАЛ», «СУАЛ» и Glencore (Швейцарская горнодобывающая компания) создана Объединённая компания РУСАЛ («ОК РУСАЛ»), входящая в список крупнейших производителей алюминия в мире [23]. В 2023 году компания произвела 3,884 млн тонн или 5,5 % мирового производства алюминия [36].

В настоящее время ОК РУСАЛ опирается на научно-технические разработки ВАМИ, Сибирского научно-исследовательского, конструкторского и проектного института алюминиевой и электродной промышленности («СибВАМИ»), инженерно-технологического

центра РУСАЛа («РУСАЛ ИТЦ», создан в 2002 году в Красноярске), института легких материалов и технологий («ИЛМиТ», создан в 2017 году в рамках сотрудничества между ОК РУСАЛ и НИТУ «МИСиС») [65].

В составе РУСАЛа институтом ВАМИ в постсоветский период разработаны проекты Хакасского, Богучанского (БЭМО – «Богучанское энергометаллургическое объединение») совместный проект компаний ОК РУСАЛ и ПАО «РусГидро»), Тайшетского алюминиевых заводов, Тайшетской анодной фабрики, а также произведена модернизация действующих Красноярского, Уральского (глиноземного производства) алюминиевых заводов, Ачинского глиноземного комбината и Николаевского глиноземного завода [11, 52]. СибВАМИ разработана система газоудаления и очистки (СГОУ), которая используется на Новокузнецком, Братском, Иркутском алюминиевых заводах, а также проектная документация строительства цеха электролиза на 300 кА с обожженными анодами на Иркутском алюминиевом заводе, реализована система автоматической подачи сырья в корпусах электролиза в рамках проекта «Экосодерберг» на Иркутском, Братском, Волгоградском алюминиевых заводах [57]. Основным разработчиком новых высокоэффективных серий электролизеров является РУСАЛ ИТЦ на базе которого проводятся НИОКР компании.

С конца 2000-х годов в отечественной алюминиевой промышленности наблюдается тенденция закрытия нерентабельных алюминиевых заводов в европейской части страны из-за высокой стоимости электроэнергии и строительство алюминиевых заводов с высокомоощными электролизерами с предварительно обожженными анодами в восточной части страны, расположенных рядом с ГЭС.

В 2012 году была принята долгосрочная поэтапная программа замены неэффективных мощностей по производству первичного алюминия на современные производства с конкурентоспособной себестоимостью, которая предусматривала общее сокращение 275 тыс. тонн первичного алюминия на Надвоицком, Богословском, Волховском и Новокузнецком алюминиевых заводах.

Особое внимание ОК РУСАЛ уделяет экологическим характеристикам разрабатываемых электролизеров. В советское время до разработки систем сухой газоочистки эффективность улавливания фтористых солей составляла порядка 80% (5 кг на тонну алюминия). Использование систем сухой газоочистки позволило снизить число выбросов до 2 кг на тонну алюминия. Разработка технологии «ЭкоСодерберг» для электролизеров с самообжигающимся анодом привело к снижению выбросов до 0,22 кг на тонну. Самые передовые на сегодняшний день электролизеры РА-550 выбрасывают в атмосферу 0,22 кг на тонну. Таким образом отечественная алюминиевая промышленность добилась снижения числа выбросов более чем в 20 раз [53].

1.3 Типы и конструкция электролизеров

Электролизер представляет собой ванну с расплавленным электролитом, в который сверху частично погружены угольные аноды. Материал анодов можно разделить на твердые углеродистые и связующие вещества. В качестве твердых углеродистых используют нефтяной и пековый кокс, а для связующего вещества – пек, получаемый при сухой перегонке каменного угля.

Электролизные ванны подключаются в электрическую схему последовательно, т.е. анодный токоподвод подводит ток к анодам первой ванны, а далее катод каждой ванны соединен с анодом следующей, образуя последовательную цепь, затем ток возвращается на источник питания через обратную шину. Однако на производстве реализуются схемы с шунтами, позволяющие подключать и отключать отдельные ванны без остановки всей группы электролизеров.

«В алюминиевой промышленности электролизеры классифицируют по следующим параметрам: по устройству анода (обожжённые аноды (ОА), самообжигающиеся аноды (СОА) Содерберга), конструкции анодного токоподвода (с боковым (БТ) и верхним (ВТ) токоподводом к аноду), силе тока (малой (до 50 кА), средней (50 – 100 кА), большой мощности (100 – 180 кА), сверхмощные электролизеры (180 кА и больше))» [12]. Каждый из данных типов использовался в разные годы в отечественной промышленности.

Электролизеры с обожженными анодами (ОА) малой мощности 23 – 24 кА использовались на Волховском (первом отечественном заводе), Днепровском алюминиевых заводах, а далее были модернизированы на силу тока 52 кА. В настоящее время не применяются.

Электролизеры Содерберга с самообжигающимся анодом и боковым токоподводом (см. рисунок 1.12) средней мощности 55 – 86 кА используются с 1939 года, были внедрены на Уральском, Новокузнецком, Богословском, Канакерском (Армения), Кандалакшском, Надвоицком, Сумгайтском (Азербайджан), Днепровском (после войны) алюминиевых заводах [27].

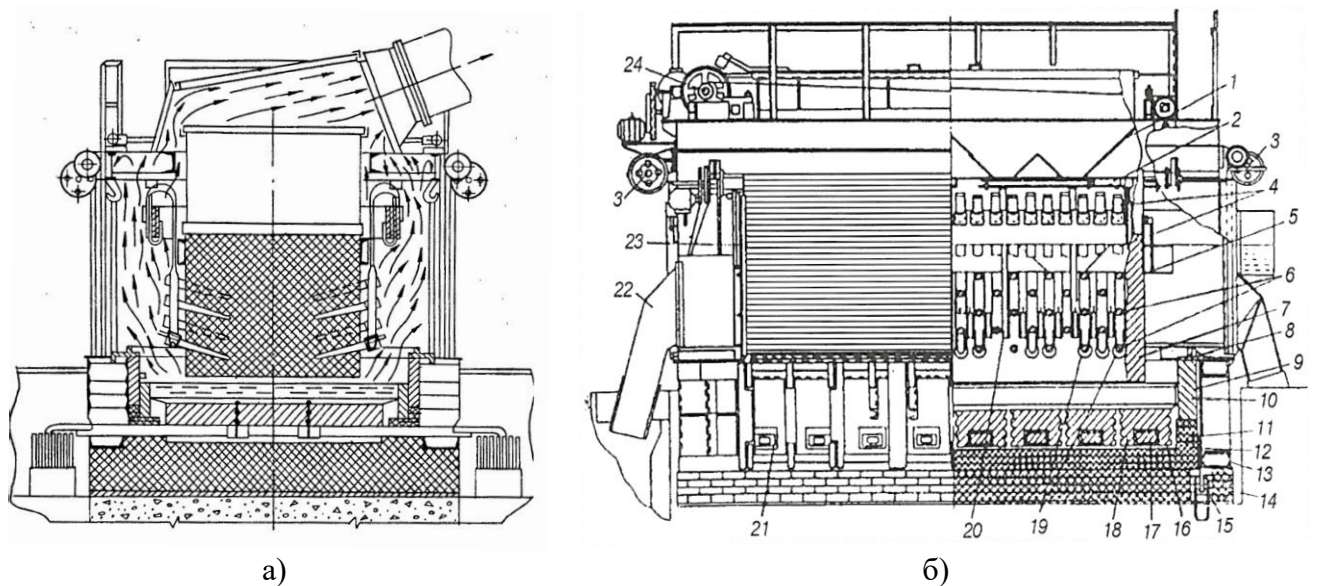


Рисунок 1.12 – Конструкция алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом Содерберга и боковым токоподводом

а) – поперечный разрез; б) – продольное разрез

1 – бункера для глинозема; 2 – затворы бункеров для глинозема; 3 – механизм подъема штор; 4 – анодные медные спуски; 5 – анодная рама; 6 – анодные штыри; 7 – анод; 8 – бортовой фланцевый лист; 9 – шамотная засыпка; 10 – боковая угольная футеровка; 11 – бровка; 12 – шамотный кирпич; 13 – катодный кожух; 14 – кирпичная кладка; 15 – анкер; 16 – угольная «подушка»; 17 – стальные катодные стержни; 18 – угольные подовые блоки; 19 – серьги; 20 – течи для глинозема; 21 – окна для катодных стержней; 22 – патрубки газоотсоса; 23 – шторы; 24 – механизм подъема анода

Источник: [40]

Именно в конструкции электролизера СОА с боковым токоподводом впервые были внедрены механизированные процессы по обслуживанию электролизеров, системы автоматизированного управления процессом электролиза с целью повысить технико-экономические показатели работы [33].

Для выполнения поставленной задачи по увеличению единичной мощности технологических агрегатов начиная с 1959 года строятся заводы только с мощными электролизерами СОА с верхним токоподводом на 130 кА (см. рисунок 1.13). Электролизеры данной мощности устанавливались на Волгоградском, Новокузнецком (НКАЗ-II), Иркутском алюминиевых заводах.

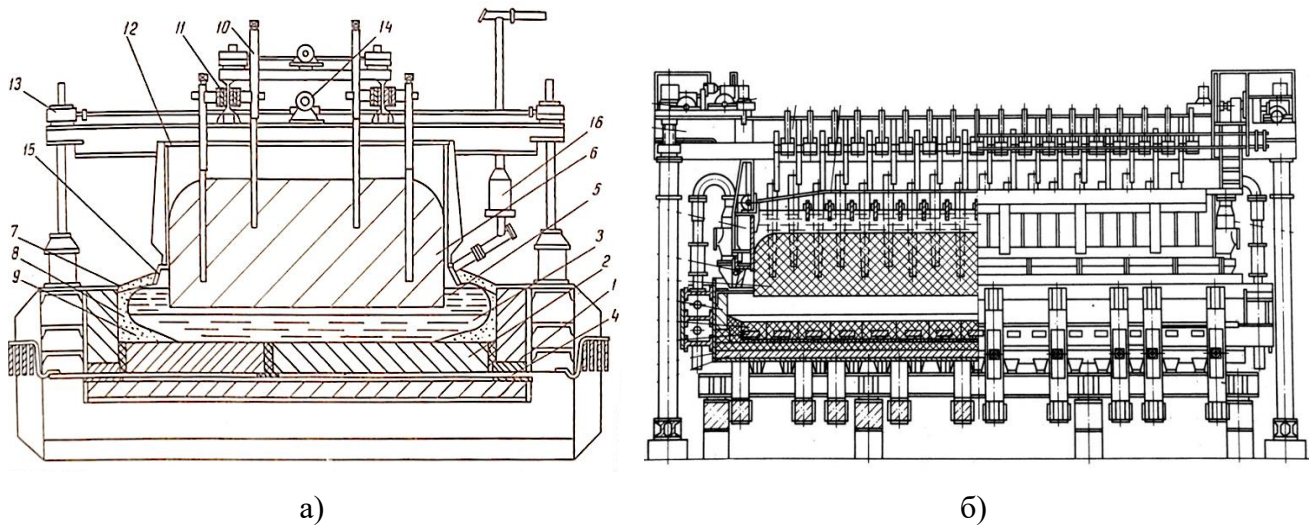


Рисунок 1.13 – Конструкция алюминиевого электролизера с самообжигающимся анодом Содерберга с верхним токоподводом

а) – поперечный разрез; б) – продольное разрез

1 – катодный кожух; 2 – подина; 3 – расплавленный алюминий; 4 – токопроводящий блюмс; 5 – электролит; 6 – анод; 7 – корка электролита с глиноземной засыпкой; 8 – подовая настель; 9 – подовая настель; 10 – анодный штырь; 11 – токоподводящая анодная шина; 12 – анодная рама; 13 – домкраты; 14 – электродвигатель привода анода; 15 – газосборный колокол; 16 – горелка. Источник: [14, 33]

Дальнейшее развитие электролизеров СОА с верхним токоподводом было связано с увеличением мощности силы тока (155 кА для серии С-8Б, С-8БМ), модификации ошиновки, анодных и катодных узлов. Электролизеры с усовершенствованной конструкцией и увеличенной мощности были построены на Братском, Красноярском, Иркутском, Новокузнецком (НКАЗ-II), Волгоградском алюминиевых заводах, общим объемом 55 электролизных корпусов [27]. Для повышения эффективности уже действующих электролизеров на Братском алюминиевом заводе предложены технические разработки, среди которых — метод управления электролизером по параметрам греющей мощности за счет увеличения периода работы электролизера с максимальной наработкой металла и стабилизации МПР [46]. Несмотря на продолжительную доработку конструкции, электролизеры Содерберга характеризуются повышенными выбросами анодных газов, трудоемкими условиями труда, высоким потреблением электроэнергии. Среди основных причин низкой эффективности электролизеров Содерберга можно выделить недостаточную тепловую и магнитно-гидродинамическую стабильность процесса, а также отсутствие надежных и эффективных систем автоматического питания электролизеров глиноземом.

Электролизеры СОА сыграли важную роль в промышленном производстве, позволили снизить себестоимость первичного алюминия и инвестировать в строительство алюминиевых

предприятий. Однако технология электролизеров СОА (применяющаяся с 1926 г.) имеет ограничение используемого тока и мощности, а также не отличается экологичностью. При эксплуатации СОА с поверхности анодов выделяются смолистые соединения, содержащие канцерогенные полиароматические углеводороды (ПАУ). Недостатки электролизеров СОА послужили причиной перехода алюминиевой промышленности во второй половине XX века на электролизеры с ОА, которые имеют большой резерв для используемого тока и мощности, и при работе которых практически не выделяют смолистые соединения.

Необходимость увеличения единичной мощности электролизной ванны, а также ужесточение требований к охране окружающей среды, потребовало от инженеров «сформулировать новое для нашей алюминиевой промышленности направление – оснащение алюминиевых заводов электролизерами нового поколения с предварительно обожженными анодами большой мощности», см. рисунок 1.14 [5]. Среди специалистов, отстаивающих переход на электролизеры с обожженными анодами, были директор ВАМИ Н.А. Калужский, заместитель директора по научной работе ВАМИ А.А. Костюков и др [5]. Электролизеры с обожженными анодами, в отличие от электролизеров Содерберга, имеют «спокойный характер» гидродинамических явлений, меньшую циркуляцию криолито-глиноземного расплава из-за равномерного выделения газов по всей поверхности анода [10].

Для реализации плана по переходу на новый тип электролизеров потребовалось провести научно-исследовательские работы по «совершенствованию конструкции электролизеров и дальнейшего повышения их единичной мощности, изучение электромагнитных и гидродинамических явлений в объеме расплава, разработки рациональной конструкции ошиновки, создание долговечного катодного устройства и эффективного газосборного укрытия с повышенным коэффициентом улавливания выделяющихся вредностей» [5].

Ошиновка электролизера ОА состоит из двух частей: анодной и катодной. К анодной относят анодные стояки и анодную раму (передает ток анододержателям). Катодная ошиновка состоит из гибких лент (катодных спусков), которые отводят ток от катодных стержней подины и катодных шин [10]. Схема ошиновки влияет на технико-экономические показатели электролизера, т.к. магнитное поле ошиновки взаимодействует с токами в расплавленном алюминии и приводят к перекошу зеркала алюминия, усиливают циркуляцию расплава, потери металла, растворению боковых гарнисажей и в конечном итоге снижению выхода по току [10]. Именно по этой причине при проектировании ошиновки инженеры перешли от использования одностороннего токоподвода к двухстороннему, а в дальнейшем изменилась схема расположения электролизеров в цеху. На современных алюминиевых заводах с высокомоощными электролизерами ванны располагаются поперек цеха друг за другом для снижения МГД-эффектов.

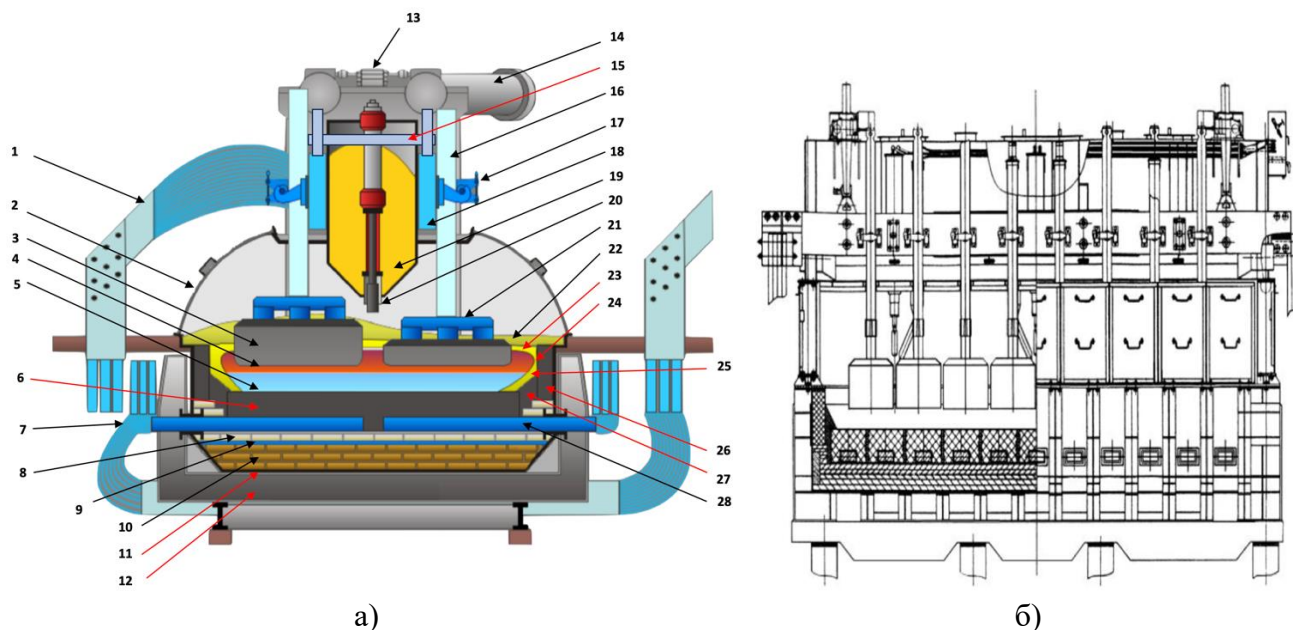


Рисунок 1.14 – Конструкция алюминиевого электролизера с обожжёнными анодами: а) – поперечный разрез; б) – продольное разрез

1 – токоподводы (анодный стояк); 2 – крышка укрытия (газоотводный кожух); 3 – анодный блок; 4 – электролит; 5 – расплав алюминия; 6 – катодный блок; 7 – токопроводящая шина, по периметру электролизера; 8 – огнеупорный кирпич; 9 – газовый барьер; 10 – теплоизоляционный кирпич; 11 – стальной корпус ванны; 12 – шпангоутный катодных кожух (опорная рама); 13 – механизм подъема анодного массива; 14 – газоотвод из ванны; 15 – анодная рама; 16 – анодная штанга; 17 – основной зажим анода; 18 – анодная шина; 19 – бункер для глинозема; 20 – пробойное устройство корки; 21 – стальная траверса; 22 – глинозем или измельченный электролит для укрытия корки; 23 – криолито-глиноземная корка; 24 – гарнисаж; 25 – настель; 26 – бортовая футеровка; 27 – тампонажная паста (набивочная масса); 28 – катодная шина (блюмс), изготовлена из металла, залита в графит или вставлена в пазы. Источник: [19].

Электролизеры с ОА оборудованы системами центральной раздачи глинозема (ЦРГ) и автоматической подачи глинозема точечного типа. Система АПГ состоит из бункера глинозема, установленного в центральной части балки-коллектора электролизера, а также пробойного устройства, который представляет собой пневмоцилиндр с наконечником на штоке. На высокомоощных электролизных ваннах устанавливают от 4 до 6 точек питания. Пробойник пробивает корку по продольной оси электролизера между анодами.

Использование программируемых логических контроллеров (ПЛК) для управления серий электролизеров позволяет непрерывно измерять ток серии $I_{серии}$ и падение напряжения на сопротивлении электролизера $U_{эл}$.

На производстве используют косвенный электрический метод измерения псевдосопротивления электролизера рассчитывается по формуле (1.54) [46]:

$$R_{\text{МПП}} = \frac{(U_{\text{эл}} - E_0)}{I_c} \quad (1.54)$$

где $U_{\text{эл}}$ – напряжение электролизера;

E_0 – обратная ЭДС;

I_c – ток серии, протекающий по электролизеру.

Параметры $U_{\text{эл}}$, E_0 , I_c непрерывно меняются и требуют стабилизации сопротивления электролизера путем регулирования его МПП перемещением анода. Поддерживать оптимальную величину МПП необходимо с учетом изменения технологического и теплового состояний электролизера.

В 1965 г. Вельчем было установлено, что для каждого значения анодной плотности тока существует такая концентрация глинозема, при которой сопротивление электролита минимально, а следовательно, и минимально напряжение на ванне [19]. На основе этих сведений были составлены кривые зависимости «сопротивление электролита – концентрация глинозема» (рисунок 1.15). Открытие данной зависимости позволило создавать различные алгоритмы питания ванны, применяемые вместе с системами АПГ [13].

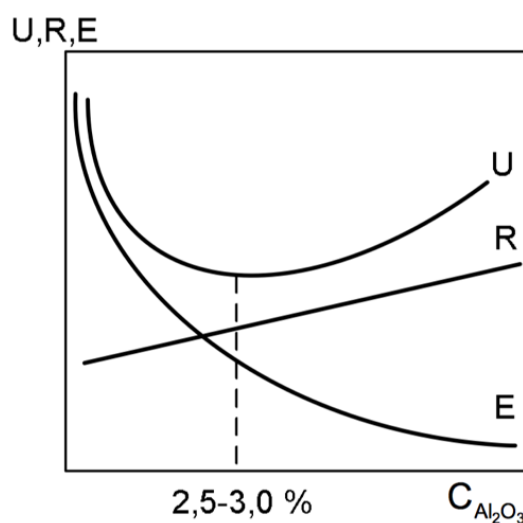


Рисунок 1.15 – Параболическая зависимость напряжения, сопротивления и обратной ЭДС от концентрации глинозема.

Источник: [6]

В таблице 1.2 представлены преимущества использования систем АПГ.

Таблица 1.2 – Преимущества использования систем АПГ в алюминиевых электролизерах.

Источник: составлено автором с использованием [13]

№ п/п	Технологические особенности	Получаемые преимущества
1	Ликвидация поточной обработки, герметизация укрытий	Снижение вредных выбросов в атмосферу
2	Снижение частоты обработок и уменьшение разовой дозы подачи Al_2O_3	Стабилизация температуры
3	Уменьшение температуры электролита, стабилизация концентрации Al_2O_3	Снижение интенсивности обратных реакций, повышение выхода по току
4	Снижение разовой дозы глинозема	Возможность работы на более низком КО
5	Стабилизация концентрации Al_2O_3	Снижение частоты анодных эффектов
6	Снижение колебаний $E_{обр}$, стабилизация концентрации Al_2O_3 ,	Повышение качества регулирования МПР
7	Снижение температуры расплава, уменьшение количества осадков	Снижение расхода электроэнергии

В 1969 году на Красноярском алюминиевом заводе построен первый корпус электролиза с электролизерами по технологии ОА мощностью 100 кА, а уже в 1972 на Волгоградском алюминиевом заводе запущены первые в мире экспериментальные сверхмощные электролизеры с силой тока 260 кА (самый мощный в мире на то время) [27]. В 1975 году на Таджикском алюминиевом заводе запущен первый пусковой комплекс, оборудованный мощными электролизерами с обожженными анодами (главный инженер проекта Г.Е. Вольфсон) [5]. С тех пор в мировой алюминиевой промышленности твердо установился тренд на строительство мощных электролизеров с ОА.

В настоящее время новые поколения мощных электролизёров, разработанные в России, используются на Саяногорском (построен в 1985 году, частично переведен на электролизеры РА-300), Хакасском (запущен в 2006 году, в составе производства 336 электролизёров РА-300 мощностью 300 кА, расход электроэнергии составляет 12 900 кВт·ч/т алюминия [64]), Иркутском (на запущенной в 2008 году 5-ой серии мощность ванн составляет 300 кА [25]), Богучанском (1-ая серия запущена в 2019 году, по проекту предусмотрено строительство 672 электролизеров РА-300Б, производительность каждого составляет 2,4 т алюминия в сутки [4]), Тайшетском (запуск 1-ой серии состоялся в декабре 2021 года, используются 352 электролизера РА-400Т, производительностью 3 т в сутки [54, 60]) алюминиевых заводах.

С 2017 года на Саяногорском алюминиевом заводе в опытно-промышленную эксплуатацию введен самый мощный электролизер РА-550 (разработан ИТЦ РУСАЛ, рабочая группа под руководством Завадяка А.В [9, 53]). При разработке данного электролизера использованы самые передовые научные достижения компании ОК РУСАЛ, именно поэтому РА-

550 имеет лучшие в отрасли характеристики: «сила тока 550 кА, выход по току 95,8 %, расход электроэнергии – 12 897 кВт·ч на тонну алюминия, при этом выбросы фтора составляют 0,21 кг на тонну металла» [55], а выбросы бензапирена отсутствуют [53]. Суточная производительность электролизера составляет 4,2 т алюминия. Для достижения данной мощности разработана «новая конфигурация ошиновки с двухсторонним подводом тока, обеспечивающая симметричное магнитное поле и высокую МГД-устойчивость без использования компенсационной петли» [55]. Электролизер РА-550 является «основной платформой для реализации новых проектов РУСАЛа по строительству новых и экологической модернизации действующих алюминиевых заводов» [62]. Эффективность систем сухой газоочистки по фтору на данном типе электролизера составляет не ниже 97%. Технические характеристики современных отечественных электролизеров представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Характеристики современных алюминиевых электролизеров ОК РУСАЛ.
Источник: составлено автором на основе [3, 4, 25, 54, 55, 60, 62, 64]

Параметр	РА-300	РА-400	РА-550
Мощность электролизера, кА	330	435	550
Расход электроэнергии кВт·ч/т алюминия	12 900	12 900	12 897
Выход по току, %	94,9	95,5	95,8
Производительность, т/сутки	2,4	3,3	4,2
Потребляемая мощность, кВтч/т	< 13 700	< 13 300	< 12 900
Эффективность улавливания фтористых соединений и электролизной пыли системой сухой газоочистки, %	99,5	98,5	98,5
Выбросы ПФУ, кг /т алюминия	0,26	0,2	0,21
Начало эксплуатации, год	2003	2006	2016

Продолжение таблицы 1.3

Параметр	РА-300	РА-400	РА-550
Реализованные проекты	Саяногорский, Хакасский, Иркутский, Богучанский алюминиевые заводы	Опытный участок Саяногорского алюминиевого завода, Тайшетский алюминиевый завод	Опытный участок Саяногорского алюминиевого завода

Срок службы электролизеров в большинстве случаев определяется качеством применяемых материалов при монтаже подины электролизера (катодных блоков) и футеровки шахты электролизера (боковых блоков), в отечественной промышленности в среднем составляет от 4 до 6 лет. Выход электролизной ванны из строя (катодного устройства) диагностируют по росту содержания железа в алюминии. Углеродный катод выходит из строя из-за проникновения натрия, образования карбидов и абразивного износа.

1.4 Основные направления развития алюминиевой промышленности

Начиная с конца 20 века развитие электролитического производства алюминия происходит в направлении постепенного увеличения мощности электролизных ванн. На текущей момент максимальная мощность одной электролизной ванны в мире достигает 660 кА, максимальная мощность отечественных электролизеров составляет 550 кА. Выход по току увеличился с момента разработки первых электролизеров с 75% до 95% [112]. С середины 20 века удельный расход электроэнергии сократился с 40 кВт·ч/кг Al до 12 кВт·ч/кг Al, рабочее напряжение современных электролизеров составляет 3,75 В, а МПР 3 см [17].

Существенную роль для достижения лучших показателей сыграли следующие разработки [107, 123]: проектирование конструкции электролизеров с использованием систем компьютерного моделирования (для компенсации магнитных полей [59, 101]), совершенствование ошиновки, разработка и внедрение электролизеров с обожжёнными анодами, точечное питание электролизных ванн глиноземом и фторосолями (системы АПГ и АПФ), изменение состава электролита, внедрение систем автоматического управления [90, 97, 103], эффективное укрытие электролизеров [17, 79], системы газоочистки, использование медных вставок при заделки блюмсов в катодные блоки [85].

Основным направлением для снижения себестоимости производства первичного алюминия является уменьшение удельной электроэнергии, на которую приходится примерно 32% всех затрат [97, 123].

Дальнейшие возможности уменьшения энергопотребления связаны с совершенствованием теплоизоляции катода, обеспечением отвода тепла от внешних

поверхностей катодного кожуха, использования дренированных катодов. Использование дренированных катодов теоретически позволяет снизить МПР с 4,5 см до 2,5 см, а значит снизить расход электроэнергии (рисунок 1.16).

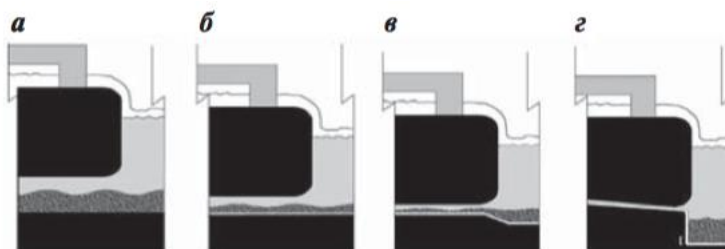


Рисунок 1.16 – Схема электролизной ванны с использованием дренированного катода: а – традиционная система, МПР = 4,5 см; б – смачиваемых катод, МПР = 3,5 см; в – дренированный катод, МПР = 2,5 см; г – дренированный катод, МПР = 2,0 см. Источник: [17].

С экологической точки зрения большой интерес представляют энергосберегающие технологии по утилизации бросовой энергии [47, 80], доля которой составляет половину от всей энергии, необходимой для электролитического получения алюминия. Лидером в данной отрасли является норвежская компания Hydro Aluminum [18, 67].

С распространением электролизеров с обожженными анодами и внедрения автоматических систем управления электролизным производством [107] частота анодных эффектов значительно сократилась, однако остается проблема возникновения локальных анодных эффектов [87], результатом которых является выделение опасных веществ, таких как перфторуглеры. Решением данной проблемы является контроль токораспределения по анодам [51, 88].

В настоящее время большинство компаний производителей алюминия занимаются разработкой технологии инертного анода, позволяющей снизить выбросы парниковых газов, а также увеличить срок службы анодов. Стоит отметить, что концепция инертных анодов впервые была обозначена Ч. Холлом в 1886 году, однако ни одна компания в мире до сих пор не смогла реализовать данную технологию в промышленном масштабе [18].

«Основные тенденции российской компании ОК РУСАЛ – увеличение используемого числа сверхмощных электролизеров с обожженными анодами собственной разработки (РА-300, РА-400 и РА-550). Следующая цель – создание электролизера мощностью 700 кА. Конструкция новейшего электролизера РА-550 отличается модульностью и новым исполнением ошиновки: ток подается с двух сторон для более эффективной компенсации магнитных полей и улучшения МГД-стабильности» [68]. РУСАЛ поэтапно внедряет собственную разработку системы видеомониторинга «Эколоджист» (рисунок 1.17), предназначенную для автоматического

наблюдения за выбросами в окружающую среду и за состоянием электролизеров. Система тестируется на КРАЗе на 5 и 6 сериях верхнего токоподвода [68, 93, 125].

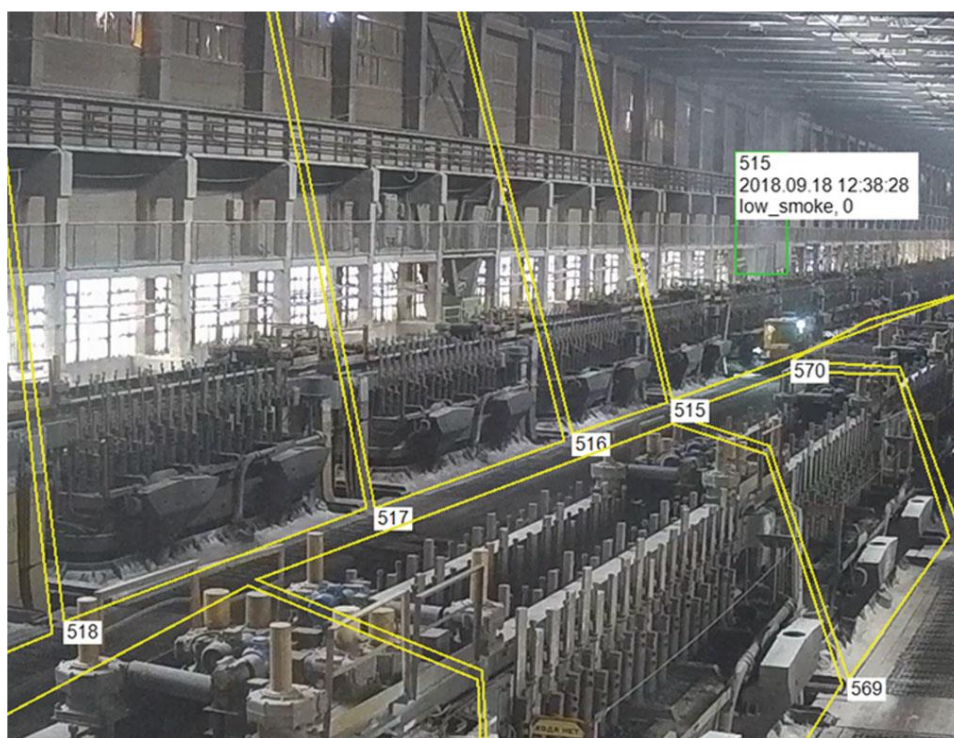


Рисунок 1.17 – Пример работы видеосистемы «Экологджист». Источник: [93]

«Компания занимается модернизацией электролизеров Содерберга с верхним токоподводом, направленной на повышение экологичности производства и снижения вредных выбросов в окружающую среду. Данная технология получила название «ЭкоСодерберг». Её реализация включает в себя двухступенчатую газоочистную установку «сухая + мокрая», позволяющую улавливать не только ПФУ, но и сернистый газ (SO_2). При использовании данной технологии эффективность удаления соединений фтора может достигать 97,5%. Во всем мире только единичные заводы оборудованы подобными комплексными газоочистками. Одним из перспективных направлений в области снижения энергозатрат является борьба с анодными эффектами» [68].

В настоящее время выделяют высоковольтный и низковольтный анодные эффекты [120]. Последний был обнаружен в середине 2000-х гг. Установлено, что низковольтные анодные эффекты приводят к образованию выбросов перфторуглеродов с течением времени. Перфторуглероды играют важную роль в образовании парниковых газов в производстве алюминия [121, 122]. «Тетрафторметан (CF_4) и гексафторэтан (C_2F_6) образуются в процессе электролиза, когда в ячейке происходит вредное явление, называемое анодным эффектом. Этот эффект тесно связан с недостатком глинозема и распределением тока в электролизной ванне» [68]. Низковольтный анодный эффект трудно обнаружить в ходе нормального процесса

электролиза, и поэтому необходимы новые инструменты для прогнозирования этого события и минимизации его возникновения [96, 120, 127].

«Неспособность восполнить концентрацию глинозема в электролите или последующая неспособность транспортировать этот насыщенный электролит в межполюсную зону приводит к анодным эффектам, явлению, при котором пассивация анодов приводит к разложению других видов фтора, с образованием газов CF_4 и C_2F_6 » [68]. Кроме того, все больше данных свидетельствует о том, что тенденции к увеличению длины электролизных ванн порождают новые типы анодных эффектов, которые трудно обнаружить [81, 126, 128]. «Анодные эффекты не только приводят к потере энергии и потенциальной нестабильности в работе электролизеров, но и способствуют парниковому эффекту, так как сопутствующие выбросы ПФУ обладают высоким потенциалом глобального потепления» [68].

Современные электролизные ванны для производства алюминия используют технологию точечной подачи глинозема по мере его потребления в электролитическом процессе [78, 89, 117]. Поскольку увеличились размеры ванн и интенсивность процесса электролиза, стало труднее контролировать процесс растворения глинозема [119, 124]. Масса глинозема, добавляемого в единицу времени, теперь намного выше, чем десять лет назад, и должна размещаться в меньшем объеме электролита.

«Серьезной проблемой для алюминиевой промышленности являются выбросы вредных веществ в окружающую среду в ходе производства. В настоящее время из-за недостаточной автоматизации, ванны часто приходится разгерметизировать и открывать, что резко уменьшает количество собираемых газов и увеличивает количество выбросов, которые вредны как для работников предприятия, так и для окружающей среды» [68].

«В настоящее время основным решением, обеспечивающим высокую производительность при производстве алюминия, является использование электролизеров с обожженными анодами и с точечной подачей глинозема. Одним из направлений повышения объема производства первичного алюминия является увеличение размеров электролизных ванн и силы тока в единицу времени. Большая часть постепенного роста силы тока на существующих площадках сопровождается увеличением размера анода, которое, параллельно, приводит к уменьшению объема ванны и доступного для растворения глинозема объема электролита. Рост размера анода часто достигается увеличением длины анода по направлению к боковым стенкам электролизных ванн. Однако, в большинстве случаев, также уменьшается ширина центрального канала. Увеличение размера анодов не только уменьшает общий объем ванны, но и заметно уменьшает и потенциальную частоту циркуляции в зонах растворения. Более того, рост цен на электроэнергию все больше заставляет металлургические предприятия ценить более высокую

энергоэффективность, а не производительность. Энергоэффективность обычно достигается за счет снижения потребляемой мощности в ваннах» [68].

Следующая тенденция в развитии технологии восстановления алюминия фокусируется на экономиях в масштабах благодаря строительству более крупных ванн, способных работать при большей силе тока [81, 113]. «С ростом размера ванн число точек питания увеличилось, но не пропорционально. Например, в технологии AP (Aluminum Pechiney) соотношение на одну точку питания за более чем 30 лет увеличилось от 50 кА на точку питания при мощности электролизной ванны 180 кА, к более чем 120 кА на точку питания при мощности ванны 600 кА. Это означает, что с ростом размера электролизера в зону питания должно быть подано больше глинозема в меньший объем электролита в единицу времени» [68].

«Новые разрабатываемые ванны мощностью более 500 кА пока ещё не могут достичь показателей эффективности менее маломощных ванн, как, например, затрат потребляемой мощности на тонну произведенного алюминия. С данной проблемой уже столкнулись многие производители. Например, Рио Тинто занимается разработкой и введением в эксплуатацию электролизеров модели APx с силой тока 500 кА параллельно AP60 с силой тока в 600 кА из-за лучших показателей энергоэффективности APx» [68].

«Одним из перспективных направлений контроля процесса производства является автоматизация отбора проб электролита и других показателей состояния процесса производства первичного алюминия» [68]. Например, предлагается для этих целей модифицировать и использовать пробойник системы АПГ и АПС [111].

1.5 Инертные аноды и вертикальные электроды

В декабре 2015 года на конференции ООН 195 стран, среди которых Китай, США (вышла из соглашения в 2020 году), Россия, Европейский союз, Бразилия, Япония, Канада и другие, подписали Парижское соглашение о климате. Цель данного соглашения – ограничить рост средней глобальной температуры в пределах 1,5 – 2 °С по сравнению с доиндустриальным периодом. Чтобы ограничить глобальное потепление до 1,5 °С, выбросы парниковых газов должны достичь пика не позднее 2025 года, сократиться на 43 % к 2030 году и достичь нулевых выбросов к 2050 году. [41]. Согласно отчету международной консалтинговой компании McKinsey, переход к нулевому уровню выбросов потребует среднегодового объема инвестиций в размере 9,2 трлн долларов США во всех отраслях к 2050 году [71]. Странам участникам требуется представить стратегии перехода на низкоуглеродную экономику. Для достижения этого обязательства необходимо внедрять передовые технологии и методы, которые помогут снизить зависимость от углеродных источников энергии [41].

Парижское соглашение стало значимым стимулом для компаний – производителей первичного алюминия, интенсифицировались технические разработки, направленные на снижение углеродного следа, чтобы соответствовать национальным целям и требованиям клиентов. В настоящее время ведутся лабораторные и полупромышленные исследования инертных (мало расходуемых) анодов, которые в процессе электролиза выделяют кислород [58]. При производстве инертных анодов применяются керамика, сплавы металлов, например на основе железа и никеля, что позволяет увеличить срок службы анодов с 30 суток (для угольных анодов) до 1 – 2 лет. Однако использование инертных анодов в промышленных масштабах может представлять опасность, из-за скопления большого количества кислорода в электролизере [16]. При производстве 1 т алюминия с использованием инертного анода выделяется 900 кг кислорода [16].

«В долгосрочной перспективе РУСАЛ надеется заменить свои VSS электролизеры на электролизеры с инертными анодами. В данной технологии отсутствуют выбросы полиароматических углеводородов, оксида углерода, а выбросы ПФУ будут меньше в 2 раза, по сравнению с современными электролизерами с обожженными угольными анодами» [68].

«На 2023 год одним из наиболее успешных проектов является Elysis – совместный проект компаний Alcoa, Rio Tinto и Apple при поддержке правительств Канады и Квебека» [68]. Ожидается, что завод коммерческого масштаба будет построен к 2030 году. Однако ученые до сих пор сталкиваются с проблемами пассивации электродов и высокой скорости коррозии анодов, что в конечном итоге приводит к нестабильности процесса электролиза [102]. Кроме того, использование инертных анодов на 20 % увеличивает потребление энергии для производства 1 кг алюминия – сырца [71], поэтому использование инертных анодов в настоящий момент может быть оправдано только на алюминиевых заводах, которые используют экологически чистую электроэнергию.

Еще одной технологией, внедрение которой позволит повысить эффективность технологического процесса производства алюминия, является технология смачиваемых катодов. В этой технологии диборид титана TiB_2 используется для улучшения смачиваемости расплавленным алюминием поверхности катода [17, 18]. Благодаря этому возможно уменьшить МПР до 50%, тем самым уменьшить падение напряжения и снизить потребление электроэнергии [71]. Использование смачиваемых катодов также позволяет перейти от горизонтального расположения электродов к вертикальному.

В своих первых электролизерах Эру и Холл использовали металлические и угольные катоды, которые были ориентированы вертикально относительно друг друга. С момента зарождения алюминиевой промышленности многие ученые предпринимали попытки внедрения твердых вертикальных электродов в промышленные электролизеры, но сдерживающим

фактором является отсутствие коммерческой технологии твердого смачиваемого катода. Использование вертикальных электродов позволит кратно увеличить мощность электролизера и снизить удельное энергопотребление за счет увеличения выхода алюминия с площади, занимаемой электролизной ванной, а также уменьшения расстояния между электродами с 14 кВт·ч до 6,2 кВт·ч на 1 кг алюминия-сырца при использовании угольных электродов, а для инертных – до 9,2 кВт·ч [102]. Наибольший экономический эффект и снижение углеродного следа при производстве первичного алюминия даст использование малорасходуемого анода, смачиваемого катода и вертикальное расположение электродов. Вертикальное расположение электродов позволяет минимизировать требования по обеспечению магнитогидродинамической (МГД) стабильности расплавов в шахте электролизной ванны [49].

Вне зависимости от материала анода, большое внимание ученых сосредоточено на исследовании формы электродов, а именно на «особенности краевого эффекта концентрации тока на периферии гладких электродов и распределения плотности тока и потенциала на неоднородной поверхности электродов. Краевой эффект и шероховатость взаимосвязаны с распределением плотности тока и потенциала и являются причиной повышенного расхода, пассивации и дестабилизации электролиза» [83]. На краях прямоугольных электродов наблюдается увеличение плотности тока, т.е. его повышенная концентрация. Использование электродов эллипсоидной формы для вертикальных электродов позволяет снизить расход анода, т.е. уменьшить электрохимическую коррозию [49]. В Санкт-Петербургском Горном университете синтезом композитных электродов с образованием на поверхности TiB_2 с целью создания коррозионностойких и смачиваемых алюминием материалов, исследованиями расхода анодов различной формы при электролитическом получении алюминия занимается группа ученых научного центра Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов во главе с д.т.н. Горлановым Е.С.

1.6 Экономическая оценка состояния алюминиевой промышленности и объемы производства

Благодаря своей легкости, прочности, пластичности и высокой коррозионной стойкости алюминий нашел большое применение в строительной, транспортной, упаковочной продукции и в многих других областях. Согласно статистике потребления, около 25% произведенного алюминия используется в строительном и 30% в транспортном секторе [68]. Доля использования алюминия в транспортном секторе будет только увеличиваться с распространением электроавтомобилей, для производства которых требуется большое количество легких и прочных материалов. Так с 2020 по 2022 года продажи электроавтомобилей увеличились в 3 раза. Использование алюминия в конструкции электроавтомобиля (корпуса электроприводов,

аккумуляторных батарей, охлаждающие пластины и радиаторы, элементы кузова) позволяет увеличить дальность пробега на одной зарядке за счет снижения веса, что приводит к снижению общего энергопотребления. Распространение алюминия увеличивается с применением высокотехнологичных сплавов на его основе. Так алюминиевые сплавы широко используются в деталях ДВС, обеспечивая предел текучести от 140 МПа до 175 МПа [73]. В строительной отрасли алюминий считается вторым по популярности металлом после стали. В упаковочной отрасли алюминий используется как один из самых безопасных материалов для упаковки продуктов питания и фармацевтических препаратов, защищает от воздействия света, кислорода и влаги [72].

По данным международного института алюминия (International Aluminum Institute) объем мирового рынка алюминия в 2022 году оценивается в 155 – 160 миллиардов долларов США, а мировое потребление и производство первичного алюминия увеличивается с каждым годом. В 2022 году было произведено 74,949 млн т алюминия, прогнозируемое производство в 2023 году составит 77 млн т с дальнейшим увеличением на 2 млн тонн каждый год в ближайшие пару лет [104], по прогнозу средняя цена реализации 1 тонны алюминия составит 2400 – 2500 долл. США в период 2023 – 2026 г. [15]. Статистика производства алюминия за 2020 – 2023 г. представлена на рисунках 1.18 и 1.19. Провал в объемах производства в 2009 году связан с мировым финансовым кризисом.

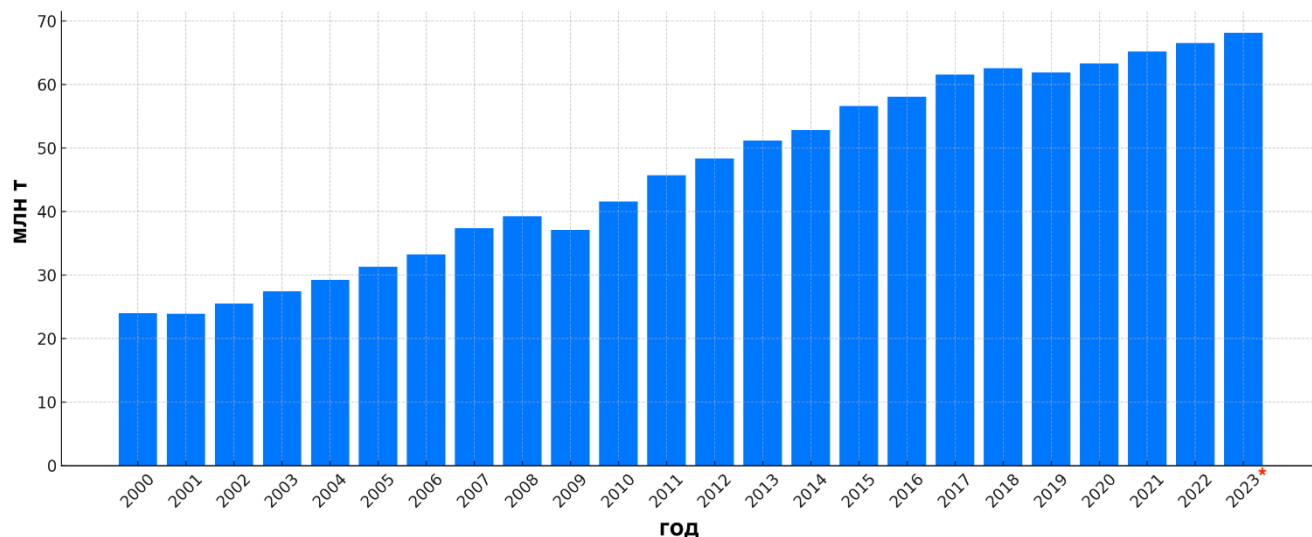


Рисунок 1.18 – График объемов производства первичного алюминия с 2000 по 2023 год (2023* год представлен оценочно).

Источник: составлено автором на основе [104]

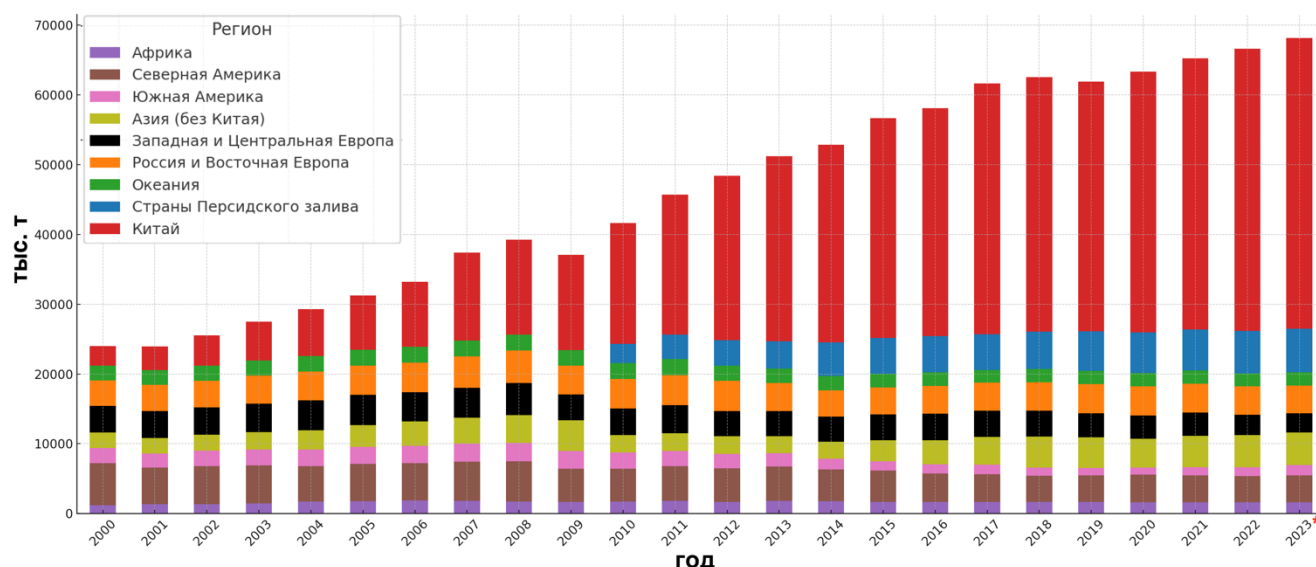


Рисунок 1.19 – График распределения объемов производства первичного алюминия по регионам с 2000 по 2023 год (2023* год представлен оценочно).

Источник: составлено автором на основе [104]

Аналитические агентства прогнозируют темпы мирового роста потребления алюминия 2,6% на 2021 – 2029 года [72]. При этом большая часть ежегодного прироста производства приходится на китайских производителей, среди которых крупнейшие компании – производители алюминия в мире Chinalco и Hongqiao Group, объемы производства каждой из которых начиная с 2022 года составляют от 6 до 7 млн т, а производство всех китайских производителей составляет свыше 40 млн т (см. рис. 1.19). Еще в 2000 году Китай производил всего 13% мировой доли первичного алюминия. Кроме того, на Китай приходится 62% мирового потребления первичного алюминия [74]. Второе место занимает регион Персидского залива, с ежегодным объемом производства около 5,9 млн т [72]. Для сравнения: все американские производители за тот же период произвели всего 750 тыс т, единственный российский производитель ОК РУСАЛ – около 3,8 млн т. Доминирование Китая в алюминиевой промышленности связано со строительством 60 алюминиевых заводов с высокомошными электролизными ваннами (от 300 до 600 кА) при поддержке правительства, а также с крупнейшими запасами бокситов в мире. Именно интеграция производства бокситов и алюминия – сырья обеспечивает китайским производителям преимущество в алюминиевой промышленности. Отставание США по объемам производства связано со старыми алюминиевыми заводами, на которых используются электролизеры с низкой мощностью и устаревшими компьютерными системами управления. Также алюминиевые заводы не имеют долгосрочных контрактов на электроэнергию и испытывают нехватку дешевых возобновляемых источников энергии. Самому новому действующему алюминиевому заводу (Mount Holly) в США 40 лет.

В перечень крупнейших компаний производителей алюминия – сырца по состоянию на 2023 год входят [15, 72]:

- 1) Chinalco (Aluminum Corporation of China) – Китайская государственная корпорация, в составе с дочерней Chalco (Aluminum Corporation of China Limited), 7,1 млн т;
- 2) China Hongqiao (China Hongqiao Group Limited, Shandong Weiqiao Aluminum & Electricity) – Китайская частная компания, 6,3 млн т;
- 3) ОК РУСАЛ – Россия, 3,8 млн т;
- 4) Xinfra – Китайская частная компания, 3,6 млн т;
- 5) Rio Tinto – Австралийско-Британская компания, поглотившая в 2007 году известную Канадскую компанию Alcan (Aluminum Company of Canada), которая в свою очередь поглотила в 2003 году Французскую компанию Pechiney SA, 3,3 млн т;
- 6) EGA (Emirates Global Aluminium) с дочерними компаниями DUBAL (Dubai Aluminium) и EMAL (Emirates Aluminium) – Объединенные Арабские Эмираты, 2,7 млн т;
- 7) SPIC (State Power Investment Corporation) – подразделение Китайской государственной корпорации, занимающееся производством первичного алюминия, 2,7 млн т;
- 8) Alcoa Corporation (Aluminum Company of America) – США, 2,5 млн т;
- 9) Vedanta Limited – Индия, 2,3 млн т;
- 10) East Hope – Китайская частная компания, 2,2 млн т;
- 11) Norsk Hydro ASA (Hydro Aluminium) – Норвегия, 2,1 млн т.

Распределение объемов производства первичного алюминия по крупнейшим странам – производителям представлено в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Распределение объемов производства первичного алюминия по странам, прогнозируемые значения на 2023 г. Источник: [115]

№ п/п	Страна	Объем произведенного алюминия, млн т
1.	Китай	41,66
2.	Индия	4,1
3.	Россия	3,8
4.	Канада	3,2
5.	ОАЭ	2,6
6.	Бахрейн	1,6
7.	Австралия	1,5
8.	Норвегия	1,3

Продолжение таблицы 1.4

№ п/п	Страна	Объем произведенного алюминия, млн т
9.	Бразилия	1,02
10.	США	0,68 млн т первичного алюминия (производственные мощности 1,36 млн т) + 3,3 млн т переработанного алюминия
11.	Иран	0,63
12.	Турция	0,350

Количество действующих алюминиевых заводов у крупнейших стран – производителей представлено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Количество алюминиевых заводов по странам в 2023 г.

Источник: [15]

№ п/п	Страна	Количество алюминиевых заводов, шт
1.	Китай	65
2.	Россия	10
3.	Канада	9
4.	Индия	7
5.	Норвегия	7
6.	США	7

Распределение используемых технологий электролизных ванн с 2000 по 2023 гг. при производстве первичного алюминия представлено на рис. 1.20. Рисунок демонстрирует вклад технологии электролизной ванны в количество выбросов перфторуглеродов (CF_4 , C_2F_6), образующихся при анодном эффекте.

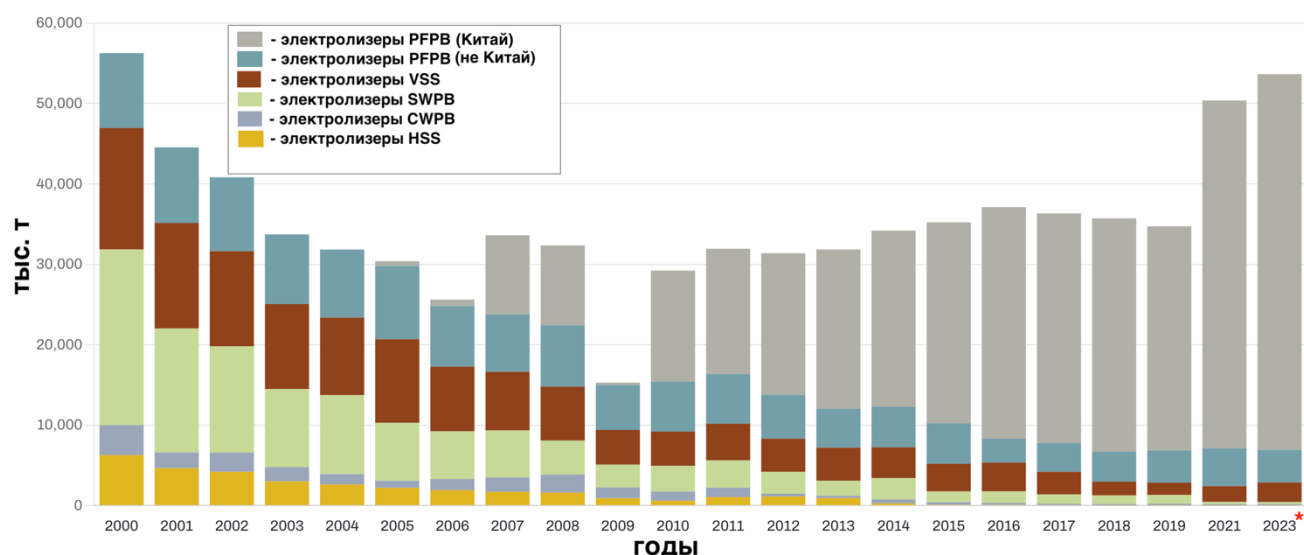


Рисунок 1.20 – График распределения выбросов ПФУ за период с 2000 по 2023 гг. тыс. т CO₂-эквивалента по типам электролизных ванн (данные за 2023* год представлены оценочно). Источник: [104]

- 1) PFPB (Point Feed Prebake) – технология электролиза с использованием обожжённых анодов и точечных питателей;
- 2) CWPB (Centre Worked Prebake) – технология электролиза с использованием обожжённых анодов и центральной балки подачи тока;
- 3) SWPB (Side Worked Prebake) – технология электролиза с использованием обожжённых анодов и периферийной обработки электролизёров;
- 4) VSS (Vertical Stud Soderberg) – технология электролиза с использованием самообжигающихся анодов Содерберга с верхним токоподводом;
- 5) HSS (Horizontal Stud Soderberg) технология электролиза с использованием самообжигающихся анодов Содерберга с боковым токоподводом.

Как видно из графика на рис. 1.20, начиная с 2007 года китайские производители алюминия стали значительно наращивать долю высокомошных электролизных ванн, работающих по технологии PFPB с предварительно обожжёнными анодами и точечной подачей глинозема. С 2000 года наблюдается тенденция стремительного сокращения электролизных ванн Содерберга, главным образом связанная с большим числом выбросов относительно технологии предварительно обожжённых анодов.

«Распределение источников используемой электроэнергии при производстве первичного алюминия, согласно данным International Aluminum Institute, приведено на рис. 1.21. Более 80% мощностей по производству алюминия в Китае обеспечивается за счет использования электроэнергии, вырабатываемой за счет использования угля» [68].

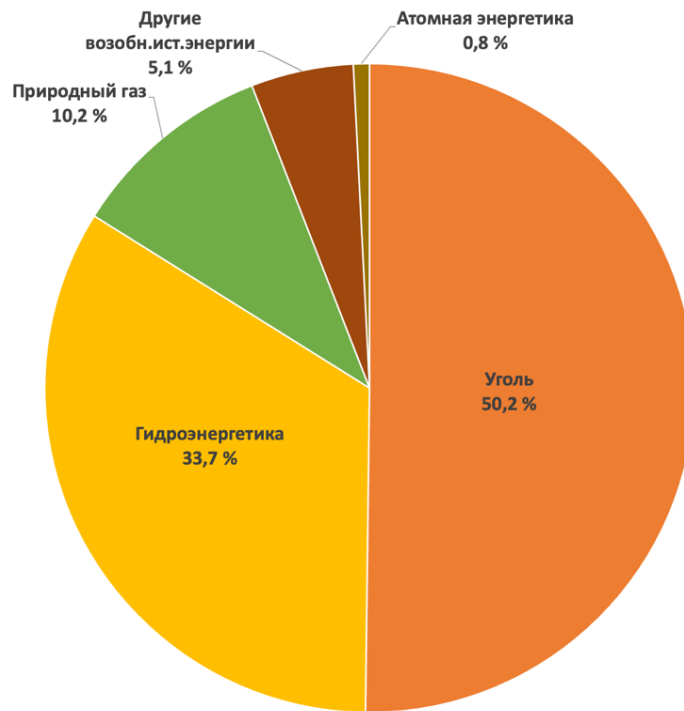


Рисунок 1.21 – Распределение источников электроэнергии при производстве первичного алюминия. Источник: [104]

Спрос на алюминий в ключевых секторах экономики представлен на рис. 1.22, распределение по регионам представлено на рис. 1.23. Как видно из графика, более 80% объема произведенного алюминия используются в транспорте, строительстве, энергетике и машиностроении.



Рисунок 1.22 – Распределение потребления алюминия по отраслям.

*ТНП – товары народного потребления.

Источник: составлено автором на основе [15]

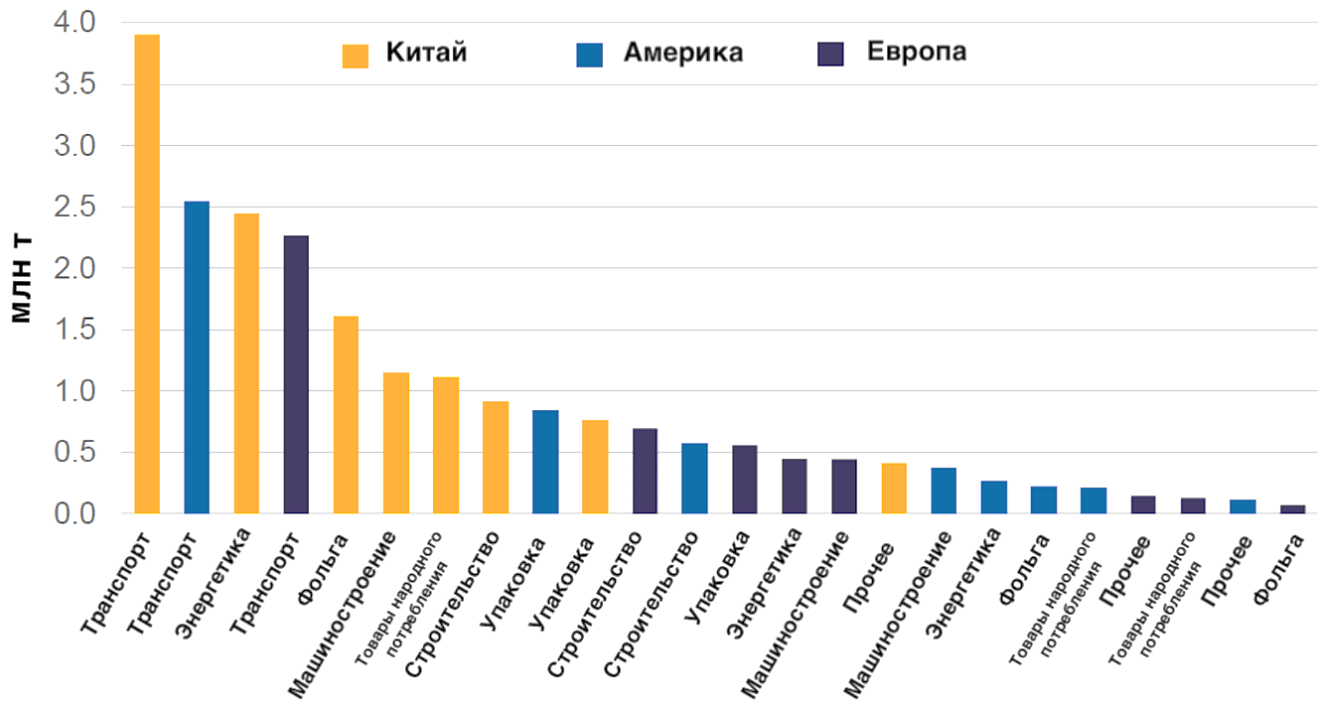


Рисунок 1.23 – Распределение потребления алюминия по отраслям и регионам на начало 2023 г. Источник: [99]

Ежегодный рост потребления алюминия, высокая энергоёмкость производства первичного металла, а также недостаточная доля переработанного алюминия в общем объёме выпуска (в Северной Америке перерабатывается только 55% от общего объема алюминиевых отходов, а в Азии объёмы производства составляют примерно 11 млн т [72]) ставят перед производителями задачу поиска новых технологических решений. Основная цель – снижение себестоимости алюминия – сырья и сокращение выбросов парниковых газов, в том числе ПФУ.

1.7 Выводы по Главе 1

По результатам проведенного анализа существующих технических решений в области систем управления и контроля электролиза КГР определены следующие тенденции:

- 1) производители первичного алюминия увеличивают мощность электролизных ванн за счет увеличения их габаритных размеров. Моделирование магнитных полей, создаваемых электролизными ваннами, позволило разработать конструкцию ошинок с эффективной компенсацией магнитных полей для улучшения МГД-стабильности, и тем самым уменьшить МПР. Одновременно с этим уменьшается объем электролита между анодом и слоем жидкого алюминия. Учитывая, что до 30 % падения напряжения в катоде обусловлено наличием криолито-глиноземного осадка, обеспечение полного растворения глинозема до достижения границы «металл – электролит» требует оперативного контроля уровня электролита;
- 2) для обеспечения стабильности процесса электролиза питание электролизных ванн глиноземом должно осуществляться в непрерывном режиме. При этом возможна реализация

раздельной схемы подачи, предусматривающей непрерывное введение малой доли глинозема и дозирование основной части по приращению напряжения, либо с использованием косвенной оценки концентрации глинозема;

3) ужесточение экологических требований вынуждает производителей разрабатывать системы мониторинга, определяющие нарушения сплошности криолито-глиноземной корки, а также локальные анодные эффекты, происходящие под отдельными анодами. Известные системы основываются на мониторинге распределения тока по анодам электролизера.

Рассмотренные тенденции развития отрасли и выявленные проблемы управления процессом электролиза обосновывают актуальность выбранной темы исследования и необходимость решения поставленных задач.

ГЛАВА 2 АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА

2.1 Электролизер как объект управления

Внедрение систем автоматического управления процессом электролиза криолито-глиноземных расплавов позволило снизить потребляемое количество энергии за счет более точного поддержания заданной величины МПР. Для разработки системы управления требуется определить возмущающие параметры, которые оказывают влияние на весь процесс электролиза. К таким параметрам можно отнести следующие: флуктуации (колебания тока серии), МПР, уровень и состав электролита, операции по замене анода, выливки металла, температура воздуха в цехе, старение футеровки ванны.

Цель системы автоматического управления состоит в компенсации возмущающих параметров. Упрощенная структурная схема электролизера представлена на рисунке 2.1.

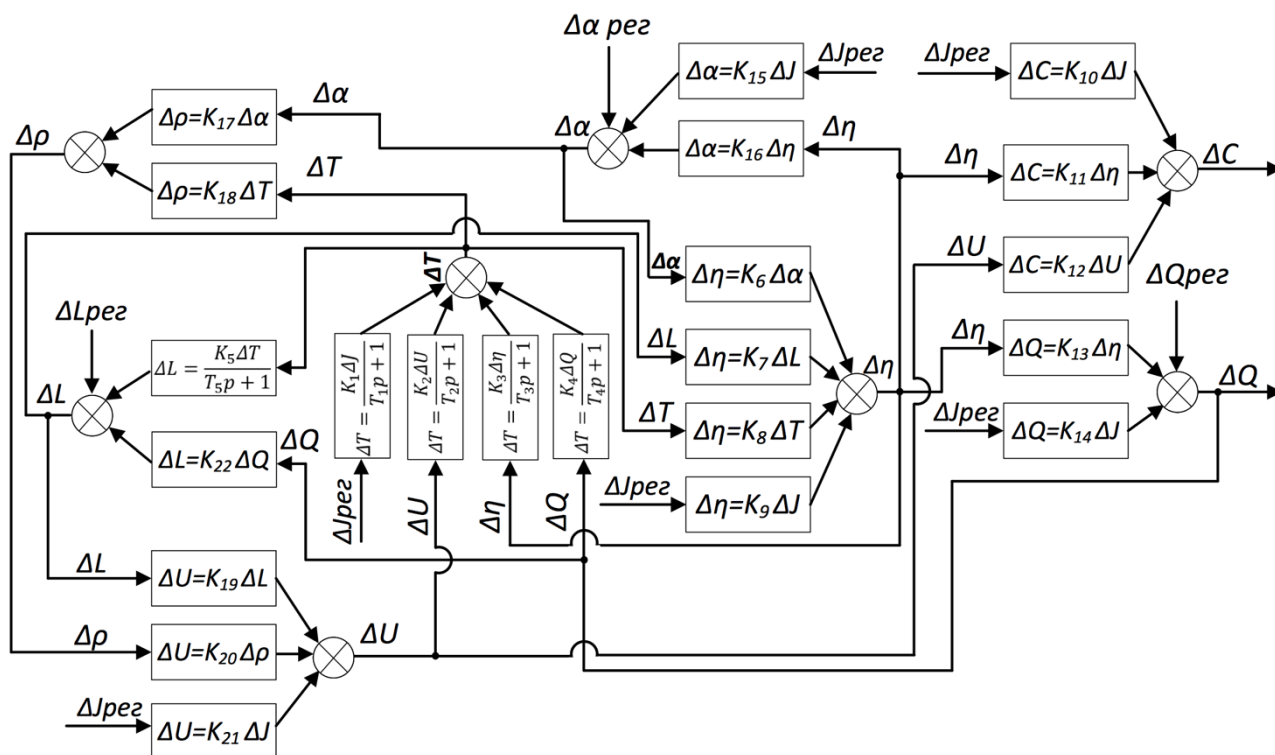


Рисунок 2.1 – Структурная схема электролизера

I – ток электролизера; L – МПР; α – концентрация глинозема; ρ – удельное сопротивление электролита; U – напряжение электролизера; T – температура электролита; η – выход по току; Q – количество алюминия; C – себестоимость алюминия.

Источник: составлено автором на основе [20]

Большинство возмущений компенсируется путем регулирующих воздействий по этим возмущениям. Т.к. скорость изменения основных технологических параметров процесса

электролиза (концентрация глинозема, температура и состав электролита, а также уровни электролита и металла) низкая, производители алюминия измеряют эти параметры раз в сутки при помощи погружных средств измерения (для уровней электролита и металла, определения температуры электролита) или используя лабораторные анализы (для определения состава электролита и концентрации глинозема).

2.2 Научно – технические достижения в области управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава

Автоматизированное управление процессом электролиза криолито-глиноземного расплава на алюминиевых заводах появилось в 1960-х годах. До этого момента использовались механизированные машины для разрушения криолито-глиноземной корки и загрузки глинозема в ванну, а также система механизированного перемещение анодов. Выливка наработанного металла из электролизера с помощью вакуумного ковша появилась в 1930-х годах. Механизированные машины для разрушения корки (в 1940-х годах использовался пневматический молот, а с 1960-х колесный боковой разрушитель) загружали несколько сотен кг Al_2O_3 , что приводило к возникновению образования осадков на подине ванны.

Система точечной АПГ была изобретена компанией Alcoa в конце 1950-х годов для электролизеров с ОА и были установлены на заводах в городах Венатчи, Рокдейле, в Бэйдине. Такие питатели подают от 1 до 3 кг Al_2O_3 после операции разрушения корки, которая происходит при помощи пневмоцилиндра, установленного по центру между анодами. Однако внедрение точечных питателей привело к проблемам накопления и застывания электролита на наконечнике пробойного устройства, к возникновению аварийных ситуаций, при которых пробитие корки не происходит. Система точечной АПГ с управлением частотой питания по росту сопротивления на ванне впервые появилась на заводе компании Alcoa на электролизерах Р-155 в г. Бэйдin (Северная Каролина) в 1964 г. На этом же заводе были впервые внедрены автоматическая регулировка положения анодной рамы, контроль напряжения и тока на серии электролизеров и на каждой электролизной ванне. Автоматическая регулировка МПР (опускание и поднятие анодной рамы) появилась в 1950-х годах для контроля напряжения на электролизной ванне, регулировании температуры электролита, а также для автоматического подавления анодного эффекта.

«В основе АПГ лежит зависимость сопротивления электролизной ячейки от концентрации Al_2O_3 открытую Вельчем в 1965 г., см. рисунок 2.2. При концентрации глинозема $< 3\%$ сопротивление электролита увеличивается из-за поляризации ячейки, которая включает в себя противо-ЭДС и напряжение пузырьков у дна анода. Сопротивление на ванне резко увеличивается при возникновении анодного эффекта, который возникает при концентрации глинозема ниже

2 %, см. рисунок 2.2. Рост сопротивления при концентрации больше 3 % объясняется повышением удельного сопротивления электролита» [86]. Обратная ЭДС зависит от плотности тока и от состояния электролизной ванны, на практике ее значения лежат в диапазоне 1,6 – 1,7 В.

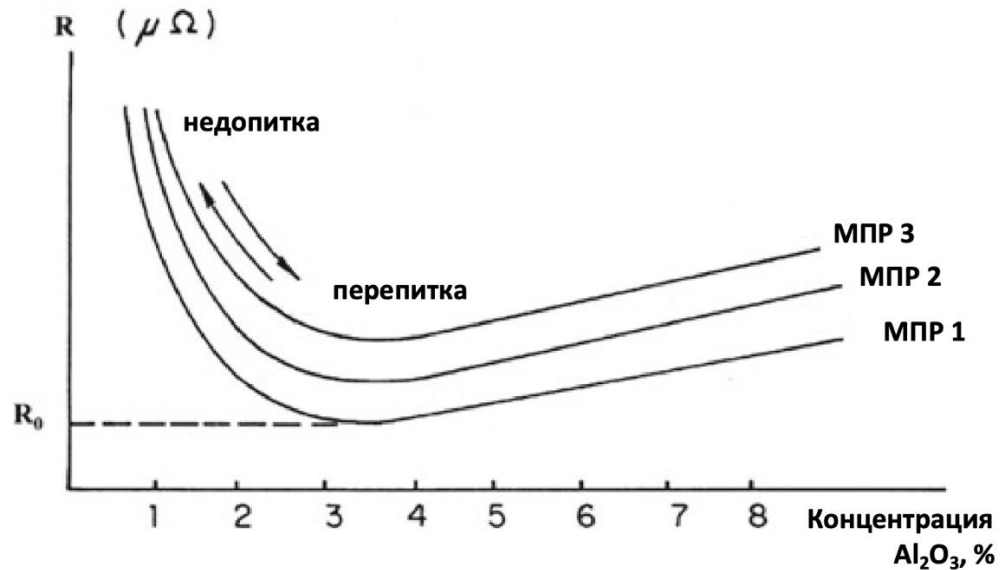


Рисунок 2.2 – График зависимости сопротивления электролизной ванны от МПР между анодом и катодом МПР 1 < МПР 2 < МПР 3. Источник: [77]

«Критериями низкой концентрации глинозема являются: увеличение сопротивления ячейки от минимума во времени ΔR , наклон сопротивления (первая производная сопротивления по времени, dR/dt) и его ускорение или кривизна (вторая производная сопротивления по времени, d^2R/dt^2)» [103].

В основе алгоритмов питания глиноземом лежат режимы подачи глинозема «кратковременная сверхперепитка», «перепитка», «недопитка» (см. рисунок 2.3), а также с добавлением режима подачи глинозема, равной расходу глинозема (см. рисунок 2.4). Кратковременная «сверхперепитка» используется после режима «недопитка», для предотвращения анодных эффектов. Режим подачи глинозема равный расходу глинозема используется раз в день для предотвращения образования осадков на подине ванны. В современных системах питания продолжительность режимов «перепитка» и «недопитка» изменяются по количеству и длительности в соответствии от концентрации глинозема, определяемому по графику псевдосопротивления.

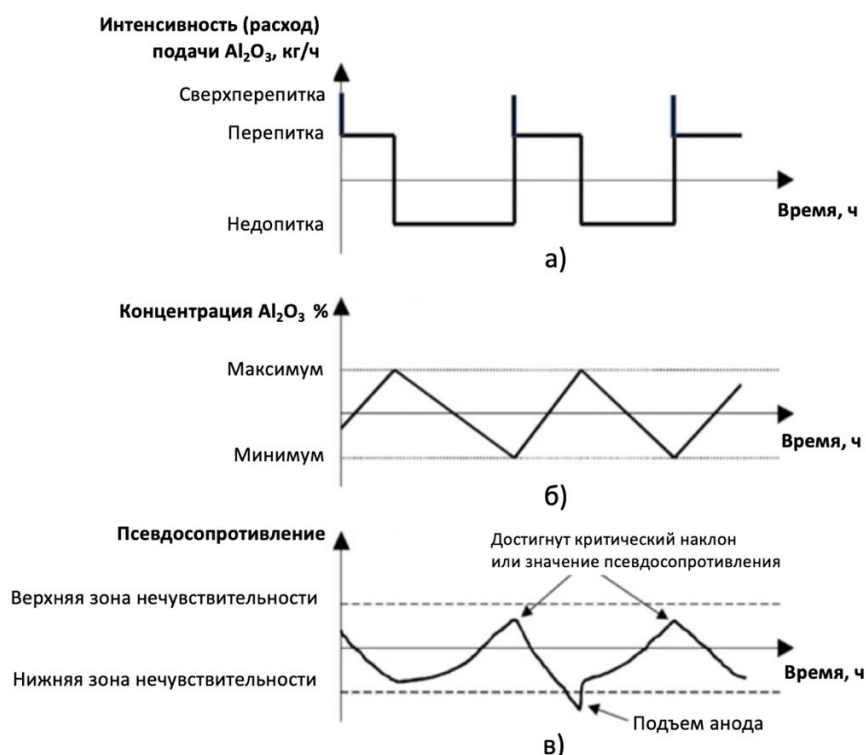


Рисунок 2.3 – Графики стандартных алгоритмов питания Al_2O_3 с режимами перепитки и недопитки глиноземом: а) график скорости подачи глинозема; б) концентрация глинозема в моменты перепитки и недопитки; в) график псевдосопротивления электролизной ванны.

Источник: [75]

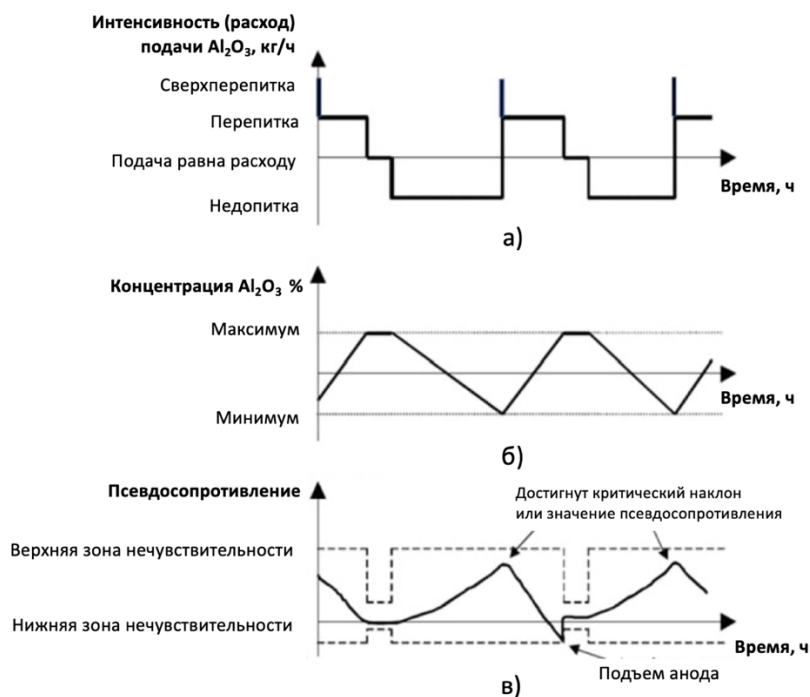


Рисунок 2.4 – Графики алгоритмов питания Al_2O_3 с тремя режимами расхода глинозема: а) график скорости подачи глинозема; б) концентрация глинозема в моменты сверхперепитки, перепитки и недопитки; в) график псевдосопротивления электролизной ванны. Источник: [75]

Внедрение точечной АПГ с алгоритмами питания, описанными выше, позволили поддерживать концентрацию глинозема в диапазоне $2,5\% \pm 1\%$.

Современная тенденция увеличения силы тока на электролизере, размеров электролизной ванны, размеров площади анодного массива, приводит к уменьшению объема электролита, доступного для растворения Al_2O_3 , а каждая точка АПГ должна подавать больше глинозема в меньший объем ванны, то есть увеличивается локальная концентрация возле точки питания. Это приводит к проблемам растворения глинозема, риску локального дефицита или избытка глинозема, локальным анодным эффектам и образованию осадков.

Идея использования наклона кривой сопротивления была предложена компанией IBM для роста продаж компьютерной техники в 1966 году [94].

«Значения сопротивления ванны накапливаются в течение определенного периода времени, и определяется средняя скорость изменения или тренд кривой сопротивления. Когда наклон или тренд достигают заданного значения, появляется сигнал о необходимости добавления глинозема в ванну» [94]. Данный алгоритм продемонстрировал 91% эффективность в прогнозировании анодных эффектов на электролизном заводе Intalco pf 15 минут до возникновения анодного эффекта [95, 103]. Американская алюминиевая компания «Kaiser Aluminum» разработала и первой внедрила алгоритм подачи глинозема по требованию, используя непрерывный мониторинг наклона графика сглаженного сопротивления ячейки. Питание по требованию внедрили на электролизеры с системой центральной пробивки корки и подачи глинозема компании Reynolds, Alcoa и Pechiney. Позднее Pechiney в системе управления электролизом ALPSYS использовала кривизну графика сопротивления (вторая производная сопротивления по времени, d^2R/dt^2) в качестве триггера для подачи глинозема.

Kaiser Aluminum первой внедрила распределенную архитектуру управления в свою АСУ ТП «Celtrol», то есть перешла от управления с использованием центрального процессора, управляющего всей серией электролизных ванн, к локальному управлению 1 – 3 электролизных ванн при помощи микроконтроллера, размещенного в электролизном цехе. Преимущество локального управления состоит в том, что каждая ванна получает свой собственный быстрый, автономный и более устойчивый контур управления. Также данное решение обеспечивает:

- меньшую зависимость от центральной вычислительной машины;
- лучшую масштабируемость по числу электролизных ванн;
- более удобное обслуживание и отказоустойчивость: сбой одного локального узла не обязательно парализует всю серию.

«Вслед за Kaiser переход к распределенной архитектуре реализовали Pechiney в АСУ ТП «Micropot» и «ALPSYS», Alusuisse с «Blue Box», VAW с «ELAS», Hydro Aluminium с «HAL2101», Reynolds с «MCU», Emirates Global Aluminium с блоком управления DUBAL «DCCU» и системой

управления ваннами «ЕГА», основанной на ПЛК, Alcoa с «QLC», включающей систему интегрированного управления ванной на основе измерений состава ванны и перегрева с помощью «STARprobe», РУСАЛ с «СААТ» и «ЭЛВИС» и китайская GAMI с «MPPIC». Эти системы широко использовались или используются по всему миру, поскольку соответствующие компании были или остаются поставщиками технологий для электролизных ячеек» [103]. На современных АСУ ТП возле пары электролизеров, управляемых одним ПЛК, устанавливается НМІ-панель оператора, на которую выводится информация об управляемых электролизерах, см. рисунок 2.5. На экране отображена следующая информация: номер электролизера, напряжение, сила тока на ванне, псевдосопротивление ванны, оценочная высота слоя наработанного металла, текущий режим подачи глинозема, крайнее измеренное значение температуры электролита и перегрев температуры ликвидуса электролита, крайние результаты лабораторного анализа металла данной ванны. Также доступны функции просмотра статистики и архива ванны, функции блокировки операций, вывод трендов в виде графиков, журнал аварий и тревог, а также функция вызова старшего сотрудника. Непосредственно с сенсорного экрана НМІ-панели оператора имеется возможность подавать управляющие воздействия на регулировку МПР, сопровождение операций при замене анодов и выливки наработанного алюминия, принудительную подачу Al_2O_3 или AlF_3 .



Рисунок 2.5 – НМІ-панель оператора, установленная возле пары электролизеров DX+ компании ЕГА на заводе в Аль-Тавиле. Источник: [105]

Снижение концентрации глинозема увеличивает перенапряжение анодной поляризации, приводит к увеличению площади покрытия пузырьками нижней поверхности анода, повышает

локальную плотность тока. Ионы фтора вступают в реакцию с углеродом и образуются ПФУ CF_4 и C_2F_6 . Сопротивление электролизной ванны резко увеличивается, что приводит к росту напряжения до 30 – 40 В. Именно для этого существуют режим питания глиноземом «сверхперепитка». Для удаления газовой пленки в системах автоматического управления процессом электролиза существует режим «зажатия ванны», то есть принудительного опускания анодной рамы, а волнение металла «смывают» газовую пленку. Изначально считалось, что возникновение анодных эффектов необходимо для очистки нижней поверхности анода, а также для сжигания угольной пены. Малое количество анодных эффектов (1 – 3 шт в сутки) считалось необходимым. Но с увеличением числа заводов с ОА, появлением АСУ ТП прогнозирующими анодные эффекты, стало признаваться, что анодные эффекты не являются обязательными, а их появление наносит ущерб экологии. Число анодных эффектов уменьшилось до 0,05 шт/день, а продолжительность анодных эффектов сократилась до 20 с [103]. Выбросы ПФУ сократились с 1050 кг эквивалента CO_2 /т алюминия в 1991 году до 20 кг эквивалента CO_2 /т алюминия в 2018 году на примере компании EGA [106].

Для контроля состояния электролизной ванны в 1973 году компания Reynolds установила систему измерения тока на каждом аноде для обнаружения скачков напряжения и нестабильности на анодах. Система проработала чуть меньше года и была демонтирована из-за слишком частых повреждений проводов, встроенных в анодные стержни. К системе вернулись после 1980-х годов (в электролизерах Alcan APЕХ, Alcoa на P225, в прототипных электролизерах Pechiney большой мощности на 280 кА), с применением индивидуальных приводов для перемещения анодов [106]. К сожалению, данные системы в настоящее время используются только в качестве исследований. Однако данная система позволяет обнаруживать на раннем этапе возникновение локальные анодные эффекты, определять проблемы в работе системы АПГ, обнаруживать неравномерное распределение глинозема, анализировать причины возникновения МГД – нестабильности, определять анод, являющийся причиной возникновения такого состояния [103].

В современных системах АСУ ТП процессом электролиза криолито-глиноземного расплава используются управление с прогнозированием на основе динамических моделях материального, теплового и электрического балансов электролизера с целью удержания основных технологических параметров в допустимом диапазоне. Системы нелинейного модельно-прогнозирующего управления оценивают технологические параметры, измеряемые раз в сутки (температура и состав электролита), и передают их в модуль управления. Нелинейная модель прогнозирующего управления (NMPC) использует модель процесса, которая передает оцененные (прогнозируемые) переменные в модуль NMPC с оптимизатором, который согласовывает прогнозируемые и измеренные переменные и вычисляет оптимальные входные

данные для контроллера электролизной ванны, минимизируя различия между прогнозируемыми и измеренными значениями, используя фильтры Калмана [106]. Наилучших результатов в данном направлении достигла компания Hydro Aluminium, создавая цифрового двойника электролизной ванны, который оценивает более 100 технологических параметров электролизной ванны каждые 5 минут, а также формирует список оптимальных действий по управлению технологическим процессом. Цифровой двойник оценивает показатели концентрации глинозема, фторсолей, КО, температуры электролита. Система внедрена на заводах в Кармёе и Сунндале в Норвегии [103].

Тенденция роста числа использования искусственного интеллекта (ИИ) в промышленности в рамках «Индустрии 4.0» также означает скорое использование ИИ в алгоритмах АСУ ТП процессом электролиза криолито-глиноземного расплава [103].

Важным технологическим параметром, определяющим состояние электролизной ванны, является содержание AlF_3 в электролите, а именно избыток фтористого алюминия, поскольку он напрямую влияет на температуру ликвидуса электролита, и как следствие на перегрев электролита, тепловой баланс электролизной ванны, форму рабочего пространства (размер толщины боковой настывли), растворимость глинозема в объеме электролита. Регулирование температуры электролизной ванны и содержания AlF_3 впервые реализовано на электролизерах HAL300 и HAL4e компании Hydro Aluminium [92]. На заводе в г. Эссене компания TRIMET впервые реализовала прямые измерения перегрева электролита с помощью датчиков FiberLab [108].

Важной разработкой, позволяющей производить измерения температуры электролита, КО и концентрации глинозема, является портативная платформа с датчиком от компании STARprobe (см. рисунок 2.6), которая была внедрена на всех заводах компании Alcoa и позволила повысить выход по току на 0,5%, снизить напряжение электролизной ванны на 35 мВ и потребление AlF_3 на 5%. Каждая платформа снабжена многоразовым наконечником, позволяющим произвести не менее 100 измерений. Платформа позволяет выполнять дифференциальный температурный анализ при помощи датчика ДТА, определять перегрев электролита, концентрацию Al_2O_3 , AlF_3 , а также CaF_2 [118].



Рисунок 2.6 – Портативная установка платформа STARprobe для определения технологических параметров процесса электролиза криолито-глиноземного расплава а) – внешний вид портативной платформы; б) фото в процессе измерения технологических показателей. Источник: [91]

В 1950-х годах электролизные ванны достигли отметки 100 кА. Дальнейшее увеличение мощности электролизеров сдерживалось эффектом МГД – нестабильности, волнением металла на подине ванны. Для решения данных проблем требовалось разработать сбалансированную ошиновку, создание которой стало возможным с появлением компьютерного моделирования термоэлектрических полей и магнитогидродинамики. Первые трехмерные модели термоэлектрических полей появились в 1970-х годах, что позволило компании Aluminium Pechiney разработать электролизеры с силой тока 300 кА (AP30) и 350 кА (AP35), а также электролизеры APЕХ на 275 кА компании Alcan. Модели МГД обеспечивают сбалансированное распределение электрического тока и магнитного тока, что снижает волнение металла и его подмыкание на подошву анода. В настоящее время производители первичного алюминия достигли значений мощности электролизных ванн 500 – 600 кА [107].

«Китайские проектные институты GAMI, SAMI и NEUI разработали собственные высокоомощные электролизеры с устойчивой МГД, с низкой анодной плотностью тока ($0,72 - 0,82 \text{ A/cm}^2$) и низким удельным энергопотреблением – менее $13 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг Al}$, а также продолжают уменьшать составляющие напряжения на электролизной ванне. Самым низким энергопотреблением является технология HAL4e Ultra от норвежской компании Hydro Aluminium, обладающая показателями $11,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг Al}$ по сравнению со среднемировым показателем $13,35 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг Al}$ » [107].

2.3 Автоматизированная система управления «АЛЮМИНИЙ»

Автоматизированная система управления (АСУ) «Алюминий» является первой отечественной разработкой в области автоматизации процесса электролиза криолито-глиноземного расплава. Непрерывный рост ежегодного потребления алюминия народным хозяйством потребовал увеличивать производство алюминия, что в свою очередь осуществлялось интенсификацией существующих производственных мощностей. Невозможность управления большим числом электролизеров и серий электролизера без систем автоматизации послужило причиной разработки АСУ. Разработка методов автоматического контроля и регулирования началась в 1950-х годах Всесоюзным научно-исследовательским и проектным институтом (ВАМИ) и конструкторским институтом «Цветметавтоматика» (ВНИКИ ЦМА), значительно опередило по качеству, масштабам и темпам внедрения зарубежные системы управления [21, 33]. Разработчиками АСУ «Алюминий» являются основоположники отечественных систем управления процессом электролиза алюминия: Деркач А.С. (кандидатская диссертация «Разработка и исследование методов и устройств для централизованного контроля алюминиевых электролизеров», 1967 г. [22]), Штерн В.И. (кандидатская диссертация «Разработка алгоритмов управления технологическим режимом алюминиевых электролизеров», 1967 г. [69]), Меликянц Р.В. [31, 32], Рабинович Б.В. (кандидатская диссертация «Исследование и разработка структур автоматизированных систем управления процессом электролиза алюминия», 1971 г. [56]), Минцис М.Я. (кандидатская диссертация «Исследование серии алюминиевых электролизеров как объекта контроля и управления», 1973 г. [34]) и др.

Разработка АСУ была поделена на следующие этапы:

- исследование процессов электролиза и описание процесса как объекта управления;
- разработка способов и алгоритмов контроля и управления процессом электролиза;
- создание специализированного комплекса технических средств автоматизированного контроля и управления;
- разработка методов эффективного использования разработанных технических средств;
- внедрение методов и средств на отечественных заводах.

Опытно-промышленные испытания проводились на Уральском и Надвоицком алюминиевых заводах в 1958 – 1961 годах на электролизерах средней мощности с боковым токоподводом, техническое задание на проектирование промышленных систем для автоматического контроля и управления было разработано в 1961 г., планомерное внедрение промышленных систем началось с 1966 г. для мощных электролизеров с верхних токоподводом, а для электролизеров с ОА начиная с 1969 г. [21]. В качестве основного регулируемого параметра установлено электрическое сопротивление межполюсного зазора.

В АСУ «Алюминий» реализованы следующие функции [21, 33]:

- регулирование положения анодов;
- автоматическая стабилизация сопротивления электролизера и как следствие стабилизация энергетического режима электролизера;
- автоматическое прогнозирование и оповещение о возникновении АЭ, регистрация начала и длительность каждого АЭ, подсчет суммарного количества АЭ;
- автоматическая отмена перемещения анода перед анодными эффектами на заданное время;
- централизованный контроль каждого электролизера из ОПУ (операторский пункт управления), автоматическая обработка и цифровая регистрация режимных параметров электролизеров (тока и напряжения каждого корпуса), времени и длительности нарушений технологического режима;
- одновременное обслуживание от 200 до 400 электролизеров одним комплексом «Алюминий» (в зависимости от используемой модификации), система контроля и управления централизованная, обегаящая, т.е. центральное устройство обработки информации поочередно подключается к каждому электролизеру;
- оперативная обработка данных и хранение архивной информации на запоминающих устройствах для последующего анализа (позволяет принимать руководством цеха оперативные решения по управлению процессом электролиза).

В АСУ «Алюминий» реализован централизованный принцип контроля и управления. К каждому электролизеру серии поочередно подключается омметр системы, установленный на центральном пункте управления. Привод анода перемещает анод вниз если сопротивление электролизера больше заданного. После этого омметр системы подключается к следующему электролизеру.

Основной режим работы АСУ – автоматическое регулирование сопротивления электролизера и положения анода с прогнозированием анодных эффектов. В этом режиме каждый электролизер прогнозируется с периодом 5 – 6 минут, а регулируется с периодом 40 минут [33].

Блок – схема системы «Алюминий» показана на рисунке 2.7.

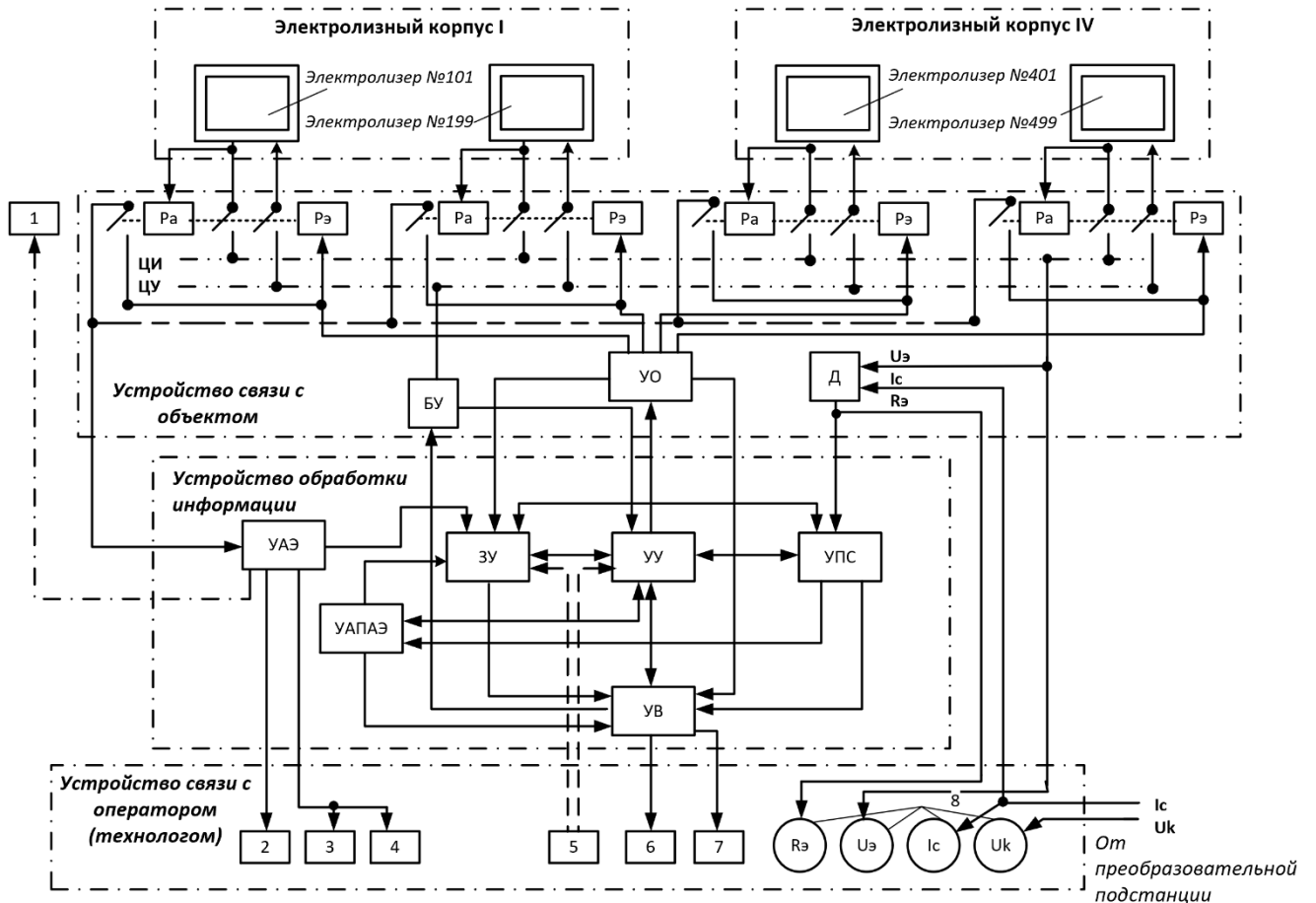


Рисунок 2.7 – Блок – схема системы «Алюминий»

ЗУ – запоминающее устройство; УУ – устройство управления; УПС – устройство преобразования и сравнения; УВ – устройство вывода; УАПАЭ – устройство автоматического прогнозирования анодных эффектов; УАЭ – устройство обработки информации об анодных эффектах; БУ – блок управления приводом анода электролизера; УО – устройства обегания; Д – датчик регулируемого параметра, ЦИ – цепи измерительные; ЦУ – цепи управления; блоки 1...4, 5...7 – номер цифрового индикатора в операторской; блок 5 – ручной ввод команды оператора; приборы 8 ($R_{э}$, $U_{э}$, I_c , U_k) – показывающие приборы

Источник: составлено автором на основе [33]

Устройства системы подразделяются на три группы: устройства связи с объектом, устройство обработки информации и устройство связи с оператором (технологом).

Устройства связи с объектом, содержат:

- 1) блок управления приводом анода электролизера (БУ) – управляет включением пускателя, а также предохраняет от недопустимых перемещений анода;
- 2) устройства обегания (УО) для выбора объекта управления – полный цикл в среднем длится 20 минут);
- 3) датчик регулируемого параметра (Д) – вычисляет величину $R_{э}$ и выдает сигнал в виде напряжения постоянного тока от 0 – 10 В, пропорциональный $R_{э}$;

- 4) цепи измерительные (ЦИ) – служат для передачи измерительных сигналов;
- 5) цепи управления (ЦУ) – служат для передачи управляющих сигналов;
- 6) R_A – реле анодного эффекта;
- 7) $R_{\text{Э}}$ – электромагнитное реле электролизера для защиты аппаратуры систем от влияния токов утечки, устанавливается между входами (выходами) системы и оборудованием цеха;
- 8) $R_{\text{Э}}$ – сопротивление электролизера, мОм.

Устройство обработки информации представлены следующими устройствами:

- 1) устройство управления (УУ) – обеспечивает определенную последовательность работы всех устройств АСУ в соответствии с заданными алгоритмами или по командам оператор;
- 2) устройство преобразования и сравнения аналогового сигнала (УПС) – преобразует аналоговый сигнал с датчика D , затем сравнивает с уставкой, заданной для данного электролизера;
- 3) запоминающее устройство (ЗУ) – хранит уставки, заданные для каждого электролизера, информацию о возникновении анодных эффектов и их продолжительности;
- 4) устройство обработки информации об анодных эффектах (УАЭ) – включает световой, звуковой сигналы, а также соответствующую ячейку на световом табло оператора, ведет учет длительности и количества анодных эффектов;
- 5) устройство автоматического прогнозирования анодных эффектов (УАПАЭ) – оповещает о приближающемся анодном эффекте, а также подает команду запрета регулировки положение анода на соответствующем электролизере;
- 6) устройство вывода (УВ) – обеспечивает вывод результатов обработки информации на устройство отображения и блок управления объектом (БУ).

К устройствам связи с оператором (технологом) относятся:

- 1) блоки 1...4, 5...7 – номер цифрового индикатора в операторской;
- 2) блок 5 – ручной ввод команды оператора;
- 3) приборы 8 ($R_{\text{Э}}$, $U_{\text{Э}}$, $I_{\text{С}}$, $U_{\text{К}}$) – показывающие приборы;
- 4) $R_{\text{Э}}$ – сопротивление электролизера;
- 5) $U_{\text{Э}}$ – напряжение электролизера;
- 6) $I_{\text{С}}$ – ток серии электролизеров;
- 7) $U_{\text{К}}$ – напряжение корпусов.

В 1975 г. все действующие серии электролиза алюминия на Богословском, Братском, Волгоградском, Иркутском, Красноярском, Надвоицком, Новокузнецком, Сумгайтском (Азербайджанская ССР) и Уральском алюминиевых заводах были оснащены системами АСУ типа «Алюминий».

Система имела следующие показатели надежности: наработка на отказ не менее 300 часов (элементная база полупроводниковая), коэффициент готовности 0,996 [21].

В поздних модификациях АСУ «Алюминий – 3» центральным устройствам обработки информации является полупроводниковая цифровая машина с запоминающим устройством на магнитном барабане. Устройства связи с объектом содержат датчики – преобразователи, блоки коммутации, управления и сигнализации, аналого – цифровые преобразователи. При проектировании разработчиками учтено влияние сильных электромагнитных полей, плавиковой кислоты, повышенная загазованность и запыленность, перепады температуры (от -40 °С до +40 °С) на устройство автоматизированной системы. Для повышения надежности применен блочный тип построения системы (в виде типовых сменных блоков), а также резервирование аппаратуры. Замена неисправного блока исправным занимает 15 – 20 секунд [33].

Внедрение АСУ типа «Алюминий» на отечественные заводы привело к увеличению выпуска алюминия, сокращению расхода электроэнергии на 1,5 % (особенно важно в условиях энергоёмкого производства), снижению расхода фтористого алюминия (от 0,57 до 1,09 кг/т), росту производительности труда у рабочих на 3%, у старших мастеров на 20%, позволило планомерно повышать силу тока серии электролизеров, увеличить выход по току, сократить численность обслуживающего персонала и в целом улучшить качество управления производством. Автоматизированная система позволила внедрить поточно регламентированное обслуживание электролизеров. Годовой экономический эффект на конец 1971 г. оценивался в сумму более 5 млн. рублей, а на конец 1975 г. более 10 млн. рублей [21].

2.4 АСУ ТП криолито-глиноземного расплава «ЭЛЕКТРА»

Одной из систем автоматического управления, используемых на отечественных алюминиевых заводах, являлась АСУ ТП «ЭЛЕКТРА» (используется на Кандалакшском алюминиевом заводе с начала 2000-х по настоящее время). Данная система имеет двухуровневую распределенную структуру, где нижний уровень состоит из ПЛК, верхний уровень – представляет SCADA систему. Структурная схема АСУ ТП представлена на рисунке 2.8.

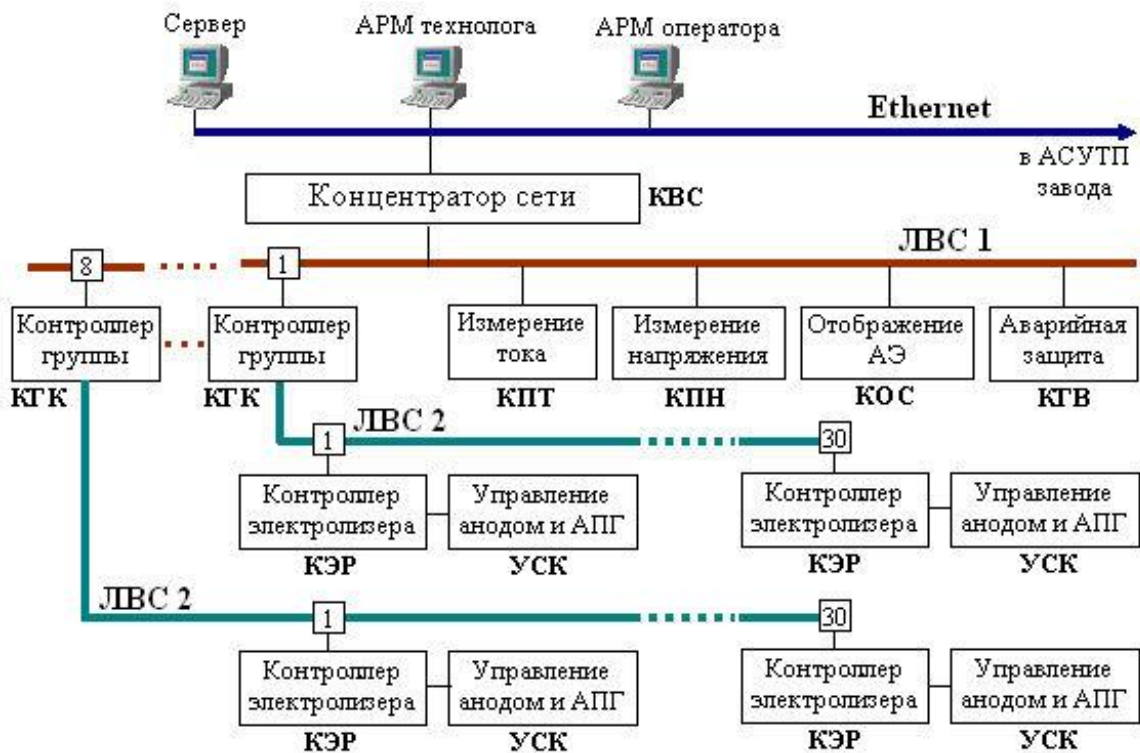


Рисунок 2.8 – SCADA система АСУ ТП электролиза алюминия «ЭЛЕКТРА». Источник: [38]

Функции нижнего уровня [39]:

- 1) сбор и обработка информации для управления технологическим процессом;
- 2) управление технологическим процессом;
- 3) ликвидация аварийных ситуаций.

Функции верхнего уровня [39]:

- 1) контроль, сбор и обработка информации о состоянии электролизеров, действиях оператора и технологического персонала в электролизном цехе, архивирование базы данных АСУ ТП на сервере;
- 2) изменение режимов регулирования, числовых значений технологических переменных, установка запретов, выдача управляющих воздействий на приводы анода;
- 3) отображение на мониторах оператора, технолога оперативной и архивной информации в виде графиков, таблиц, сообщений;
- 4) выдача речевых сообщений, выбранных оператором из меню, по громкой связи в корпуса электролиза.

Связь верхнего и нижнего уровней обеспечивается через концентратор вычислительной сети (КВС), который производит сбор информации с контроллеров нижнего уровня по линиям связи ЛВС, ее первичную обработку и передачу в сервер базы данных (устанавливается в помещении центрального поста управления). Концентратор вычислительной сети реализован на базе промышленного компьютера. Локальная вычислительная сеть организована на базе

стандартного интерфейса RS-485. В качестве приемо-передающего устройства использован приемопередатчик MAX1480 с гальваническим разделением 1500В. В качестве кабеля связи используется экранированная витая пара.

Специализированные контроллеры нижнего уровня.

Контроллер групповой коммуникации (КГК) обеспечивает обмен информацией между концентратором вычислительной сети и группой контроллеров электролизеров, группа может включать до 30 контроллеров электролизеров. Контроллер устанавливается в помещении электролиза.

Контроллер электролизера (КЭР) или контроллер управления приводом (КУП) (индивидуальный для каждого электролизера) обеспечивает реализацию функций индивидуального управления электролизером во всех технологических режимах. КЭР обеспечивает автоматическое регулирование межполюсного расстояния, а также автоматическое управление подачей глинозема и фторсолей (при наличии системы АПГ на электролизере). КЭР может устанавливаться как на стенах или колоннах помещения электролиза, так и на электролизере. Данный ПЛК построен на базе микропроцессорного центрального модуля SmartCore американской компании Z-World Engineering (ZiLOG) (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Контроллер электролизера АСУ ТП «ЭЛЕКТРА» (справа) и устройство силовой коммутации (слева). Источник: материалы автора.

Контроллер преобразования тока (КПТ) обеспечивает измерение тока с датчика серии, а также напряжения с измерительного шунта. Осуществляет передачу данных в локальную

вычислительную сеть. Контроллер устанавливается в помещении кремниевой питающей подстанции.

Контроллер преобразования напряжения (КПН) обеспечивает измерение корпусных напряжений (серии) и передачу данных в локальную вычислительную сеть. Устанавливается в помещении электролиза.

Контроллер отображения и сигнализации (КОС) обеспечивает звуковую сигнализацию о возникновении анодных эффектов в полусерии (корпусе) и отображение на собственном матричном дисплее номеров электролизеров с анодными эффектами. Контроллер устанавливается в помещениях отдыха или совещаний технологического персонала в корпусе электролиза (один или два контроллера), например, на стене.

Контроллер групповых выключателей (КГВ) обеспечивает ручное, дистанционное и автоматическое управление групповыми контакторами. Ручное управление осуществляется кнопками, расположенными на панели управления контроллера. Дистанционное - с пульта оператора, автоматическое по команде контроллера электролизера, в котором была обнаружена предаварийная ситуация. Контроллер групповых выключателей устанавливается в помещении центрального поста управления.

Устройство силовой коммутации (УСК) обеспечивает управление двигателями привода анода, электроклапанами пневмораспределительных устройств системы АПГ и загрузки фторсолей. В состав устройства, в зависимости от модификации, могут входить один или два реверсивных магнитных пускателя, автомат питания с расцепителем, органы ручного управления двигателями привода анода, электроклапанами пневмораспределительных устройств. В случае использования на электролизере двух двигателей привода анода предусмотрен режим ручного устранения перекоса анодной рамы. Также в состав устройства силовой коммутации входят пружинные блоки зажимов, обеспечивающие надежное подключение внешних связей контроллера электролизера. Устройство силовой коммутации имеет исполнение IP66 и может располагаться как на стенах помещения электролиза, так и на электролизере. Измерение напряжения электролизера $U_{\text{э}}$ проводится в двух диапазонах:

- 1) 0-10 В при $U_{\text{э}} < 7$ В, погрешность преобразования $< 0,1$ %;
- 2) 0-100 В при $U_{\text{э}} > 7$ В, погрешность преобразования $< 0,2$ %.

Диапазон измерения тока сери $I_{\text{с}}$, 0-100 кА, погрешность преобразования 0,1 %.

Имеются два режима работы тракта измерения: режим измерения и режим тарировки. Режим тарировки предназначен для оценки погрешности измерения и последующего ее учета в виде коэффициентов.

В аппаратуре системы применена периодическая автоматическая калибровка измерительных трактов контроллеров, парирующая технологические, временные и

температурные воздействия на их точностные характеристики. Итоговая суммарная относительная погрешность измерений в условиях электролизного производства не превышает [39, 45]:

- 1) напряжение электролизера в диапазоне 1-10В: $\pm 0.05\%$;
- 2) напряжение электролизера в диапазоне 10-100В: $\pm 0.1\%$;
- 3) напряжение датчика тока серии: $\pm 0.05\%$;
- 4) напряжение корпусов в диапазоне +800В: $\pm 0.3\%$.

SCADA система «ЭЛЕКТРА» обеспечивает взаимодействие оператора с системой, сбор, обработку и отображение информации из контроллеров системы.

Пульт оператора представляет собой организованное автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора с установленными 4-мя мониторами (по числу корпусов электролизного цеха), на которых запущена SCADA система, отображающая состояние каждого из корпусов электролизного цеха.

Главный экран SCADA системы представляет собой цветное поле – таблицу (каждая клетка представляет собой условные обозначения электролизера), в котором цветом и значками отображается информация о состоянии электролизеров см. рисунок 2.10.

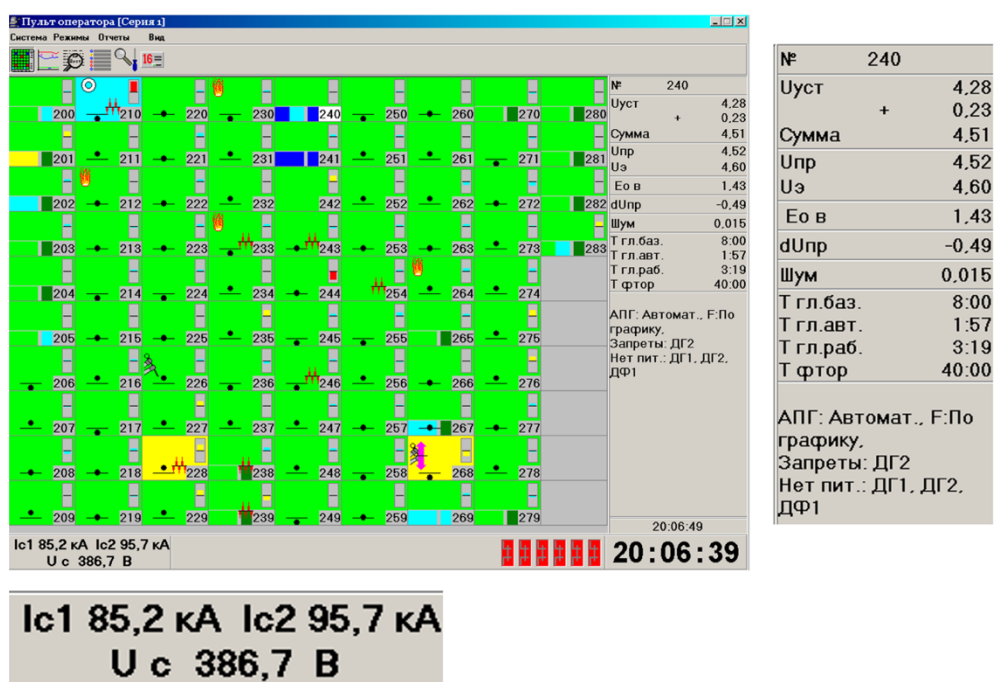


Рисунок 2.10 – SCADA система АСУ ТП электролиза алюминия «ЭЛЕКТРА» с условными обозначениями состояния электролизных ванн.

Источник: [38]

В правой части отображается поле параметров выбранного электролизера.

В правой нижней части экрана отображается поле главных контакторов. Состояние контакторов обозначается цветами: зеленый – выключен, красный – включен, знак вопроса – неизвестно.

В левой нижней части экрана отображаются значения тока серии и напряжения корпуса.

В верхней области экрана имеется панель кнопок для переключения страниц. Доступны страницы состояния электролизеров, графиков, параметров электролизера, активных сообщений (анодные эффекты, отсутствие связи), событий системы (установка режимов, управление).

Цветовое обозначение режимов работы электролизеров:

- 1) серый – отсутствует связь с контроллером;
- 2) синий – ручной режим управления;
- 3) зеленый – режим автоматического регулирования;
- 4) желтый – регулирование приостановлено;
- 5) голубой – электролизер снят с регулирования;
- 6) красный – на электролизере анодный эффект;
- 7) малиновый – нет питания механизации.

Оператор также имеет возможность просматривать графики основных технологических параметров во времени (рисунок 2.11): напряжение приведенное, напряжение уставки, график тока серии.

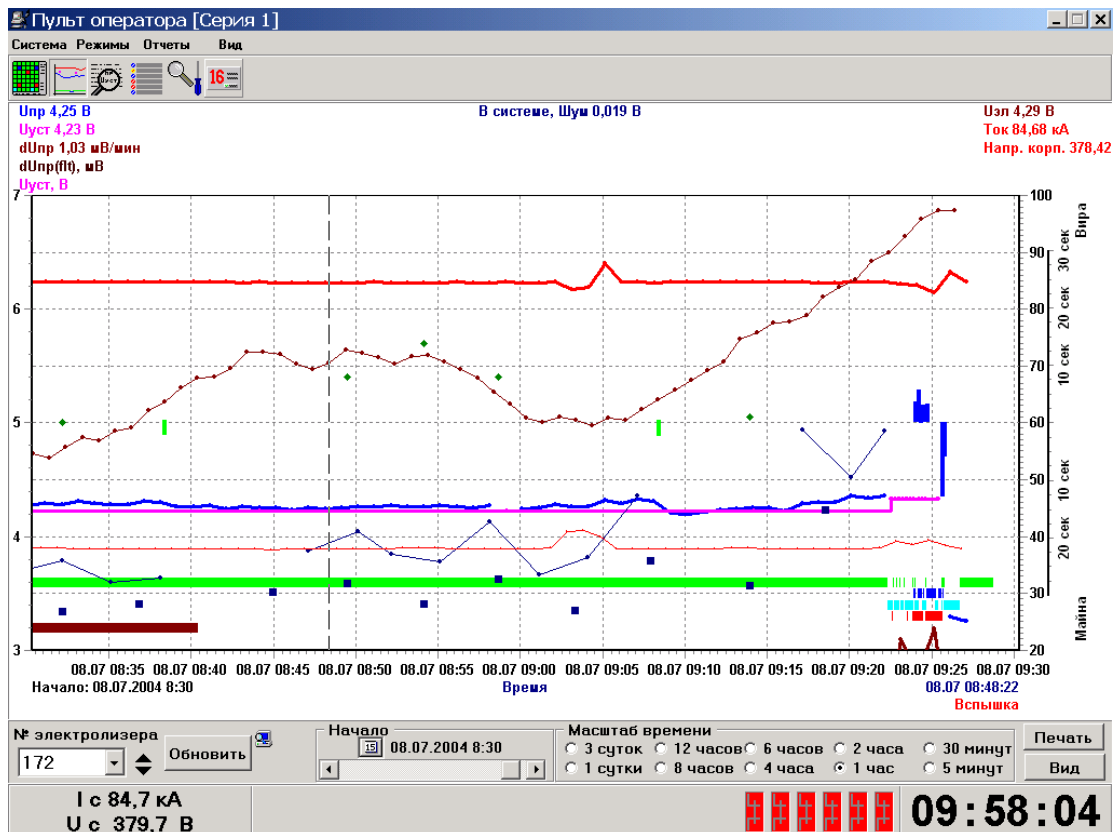


Рисунок 2.11 – Просмотр графиков напряжения и тока на серии электролизеров.

SCADA система также позволяет просматривать окно событий (рисунок 2.12): перетяжка анодной рамы, регулирование МПР, волнение металла, вспышки – возникновение анодных эффектов с указанием номера электролизной ванны, а также установки напряжения уставки.

Имеется возможность выгрузки архива данных со всеми автоматически собираемыми параметрами (рисунок 2.13), что является важной функцией для технологов.

Дата	№эл	Пользователь	Описание
08.07.2004 09:59:09	212	Сеннов А.В.	Сняты запреты Перетяжка
08.07.2004 09:53:29	139	Минков А.М.	Установлены запреты Переключение
08.07.2004 09:49:48	228	Емельянов С.П.	Установлены запреты Переключение
08.07.2004 09:49:12	120	Зайцев И. Н.	Установлена уставка 4.35
08.07.2004 09:49:10	120	Зайцев И. Н.	Перемещение анода 5,20
08.07.2004 09:47:27	201	Система	Изменены режимы АПГ: Тлит = 230, ТФлит = 2400, АПГ: Голд, АПГ: Автомат, Фтор: График
08.07.2004 09:47:09	201	Система	Изменены режимы АПГ: Тлит = 230, ТФлит = 2400, АПГ: Автомат, Фтор: График
08.07.2004 09:45:12	212	Ручной	Установлены запреты Перетяжка
08.07.2004 09:42:56	129	Ручной	Сняты запреты Перетяжка
08.07.2004 09:42:45	209	Сеннов А.В.	Установлены запреты Переключение
08.07.2004 09:42:35	168	Бертош Л.А.	Установлены запреты Перетяжка
08.07.2004 09:42:12	168	Ручной	Сняты запреты Переключение
08.07.2004 09:34:40	217	Емельянов С.П.	Установлены запреты Перетяжка
08.07.2004 09:34:32	217	Ручной	Сняты запреты Переключение
08.07.2004 09:32:00	212	Сеннов А.В.	Установлены запреты Перетяжка
08.07.2004 09:31:53	212	Ручной	Сняты запреты Переключение
08.07.2004 09:31:07	215	Емельянов С.П.	Сняты запреты Перетяжка
08.07.2004 09:28:44	224		Вспышка
08.07.2004 09:28:17	129	Ручной	Установлены запреты Перетяжка
08.07.2004 09:26:02	136	Зайцев И. Н.	Установлена уставка 4.17
08.07.2004 09:25:44	128	Зайцев И. Н.	Установлена уставка 4.26
08.07.2004 09:25:32	127	Зайцев И. Н.	Установлена уставка 4.23
08.07.2004 09:25:09	126	Зайцев И. Н.	Установлен режим стабилизации dI: 0,000, vр.уд.: 0, vр.сн.: 0
08.07.2004 09:25:06	224		Вспышка
08.07.2004 09:24:59	126	Зайцев И. Н.	Установлен режим стабилизации dI: 0,000, vр.уд.: 0, vр.сн.: 0
08.07.2004 09:24:49	224		Вспышка
08.07.2004 09:24:41	172		Вспышка
08.07.2004 09:24:30	172		Вспышка
08.07.2004 09:24:01	172		Вспышка
08.07.2004 09:23:53	224		Вспышка

Рисунок 2.12 – Окно просмотра событий и сообщений.

Источник: [38]

Дата смена	Uпр В	Uуст+ В	Uэл В	Uэл без АКВ В	Анодн. эффекты			Время технологических операций, сек							АПГ глино-зем	Тлит, сек	фтор-соли	Выливе время	
					Кол. во	Т с	Т о	в рег.	в руч.	кап. рем.	пере-тяжка	пере-ключ.	мех.	элек.					техн.
03.07.2004 1	4,23	4,17	4,17	4,28	4,28				5566										
03.07.2004 2	4,28	4,25	4,27	4,33	4,33				5536	3									
03.07.2004 3	4,39	4,26	4,26	4,41	4,41				7321										
03.07.2004 4	4,33	4,30	4,31	4,37	4,37				7196										
03.07.2004 с	4,31	4,24	4,25	4,35	4,35				25828	3									
04.07.2004 1	4,32	4,30	4,30	4,37	4,37				5586										
04.07.2004 2	4,41	4,30	4,36	4,79	4,47	1	125	125	16417	183									
04.07.2004 3	4,43	4,30	4,34	4,48	4,48				3286	4									
04.07.2004 4	4,34	4,30	4,31	4,38	4,38				7196										
04.07.2004 с	4,37	4,30	4,33	4,50	4,42	1	125	125	32485	187									
05.07.2004 1	4,33	4,30	4,31	4,37	4,37				5530										
05.07.2004 2	4,33	4,30	4,33	4,37	4,37				5592										
05.07.2004 3	4,60	4,30	4,58	4,64	4,64				5397										
05.07.2004 4	4,54	4,30	4,54	4,59	4,59				5593										
05.07.2004 с	4,45	4,30	4,44	4,50	4,50				22112										
06.07.2004 1	4,53	4,30	4,51	4,58	4,58				5530										
06.07.2004 2	4,48	4,30	4,47	4,53	4,53				5591										
06.07.2004 3	4,44	4,30	4,43	4,49	4,49				5532										
06.07.2004 4	4,39	4,29	4,38	4,44	4,44	1	109	109	5522	3									
06.07.2004 с	4,46	4,30	4,45	4,51	4,51	1	109	109	22175	3									
07.07.2004 1	4,30	4,21	4,27	4,35	4,35				5394	16									
07.07.2004 2	4,30	4,21	4,23	4,34	4,34				5338	3									
07.07.2004 3	4,23	4,21	4,22	4,27	4,27				5531										
07.07.2004 4	4,24	4,21	4,22	4,28	4,28				5467	9									
07.07.2004 с	4,27	4,21	4,23	4,31	4,31				21730	28									
08.07.2004 1	4,22	4,19	4,20	4,26	4,26				5397										
08.07.2004 2	4,22	4,19	4,20	4,27	4,27				7329										
08.07.2004 3																			'00:00'
08.07.2004 4																			'00:00'
08.07.2004 с	4,22	4,19	4,20	4,26	4,26				12726										

Рисунок 2.13 – Окно отчета по электролизеру.

Источник: [38]

2.5 АСУ ТП криолито-глиноземного расплава «ТРОЛЛЬ»

Автоматизированный технологический комплекс (АТК) «ТРОЛЛЬ» разработан отечественной компанией ТоксСофт, получил широкое распространение в начале 2000х годов и используется по настоящее время. АСУ ТП «ТРОЛЛЬ» была внедрена на Братском, Волгоградском, Волховском, Иркутском, Саяногорском, Надвоицком, Новокузнецком, Уральском алюминиевых заводах, Запорожском производственном алюминиевом комбинате, а также на зарубежном алюминиевом заводе в Черногории (Kombinat Aluminiјuma Podgorica).

АТК «ТРОЛЛЬ» включает в себя комплекс управляющих технических средств (блоки управления), программное обеспечение, а также технологическое оборудование для подачи глинозема (АПГ).

Автоматический комплекс «ТРОЛЛЬ» служит для управления процессом электролиза алюминия на уровне отдельных установок до целого завода. Он осуществляет мониторинг и регулировку процесса используя следующие функции [1, 37]:

- *Регулирование напряжения электролиза.* Комплекс автоматически измеряет напряжение на каждом устройстве каждые 55 мс, с последующим усреднением и сглаживанием данных за 1 секунду, 3 секунды и 3 минуты, а также корректирует напряжение для каждого электролизера.
- *Поддержание межполюсного напряжения.* На основании вычисленного приведенного напряжения автоматически выдаются сигналы на двигатели перемещения анода для удержания заданного МПР электролизеров.
- *Поддержание концентрации глинозема.* Комплекс обеспечивает поддержание оптимальной концентрации глинозема в электролите, управляя пробойниками и дозаторами для точной корректировки его уровня, что исключает необходимость постоянной обработки и позволяет проводить точечную корректировку при необходимости.
- *Выявление и устранение магнитогидродинамической неустойчивости (МГД).* Система автоматически обнаруживает волнение в ванне, регулируя напряжение для его устранения по специальному алгоритму.
- *Обнаружение анодных эффектов и их контроль.* При обнаружении анодных эффектов комплекс предупреждает операторов и автоматически корректирует ситуацию, подавая необходимое количество глинозема для их нейтрализации используя АПГ.
- *Управление частотой анодных эффектов.* Комплекс позволяет не только поддерживать необходимую частоту анодных эффектов, но и планировать время их появления, предоставляя возможность запрашивать анодные эффекты по желанию.

- *Поддержание криолитового отношения.* Система автоматически регулирует подачу фтористых солей на основании регулярных измерений, чтобы поддерживать криолитовое отношение на нужном уровне.

Эти функции обеспечивают эффективное и точное управление процессом электролиза, повышая качество продукции и эффективность производства.

Автоматизированный комплекс управляет и поддерживает регулярные операции в процессе электролиза (сопровождает регламентные операции) [1, 37]:

- *Управление процессом выливки металла.* Комплекс гарантирует надлежащее проведение процесса выливки, поддерживает тепловой баланс ванн и следит за корректностью выполнения операций рабочими.
- *Регулировка положения анодного кожуха.* Автоматически компенсирует изменения, возникающие в результате износа анода, для ванн с верхним подключением электрода.
- *Автоматизация перестановки штырей.* Предоставляет автоматическое руководство по перестановке штырей (для электролизеров Содерберга) для систем с верхним и боковым подключением.
- *Замена анодов.* Обеспечивает автоматизированное ведение процесса замены анодов в ваннах с использованием обожженных анодов.
- *Управление режимами работы электролизера.* Поддерживает специализированные настройки для стартовых ванн и ванн, находящихся на капитальном ремонте.
- *Сопровождение обработок.* Если аппаратура АПГ отсутствует или не работает, функционал управления обработками позволяет планировать и осуществлять как запланированные, так и внеплановые операции.
- *Перетяжка анодной рамы.* Автоматически перемещает анодную раму в пределах установленных параметров, контролируя состояние ванны (для ванн с обожженными анодами).
- *Коррекция перекоса анодной рамы.* Для систем с двойным приводом анода предоставляется возможность как ручной, так и автоматической коррекции перекоса рамы, при условии наличия соответствующих датчиков.

Режимы работы АПГ АСУ ТП «ТРОЛЛЬ».

АСУ ТП «ТРОЛЛЬ» обеспечивает два режима работы АПГ: по таймеру и поддержание концентрации глинозема [37].

В режиме по таймеру, в электролит подаются одинаковые дозы глинозема через равные промежутки времени в случае, если одновременно [37]:

- а) автоматическая работа АПГ не запрещена и не работает поиск анодного эффекта;

б) имеет место одна из следующих ситуаций:

- работа алгоритма поддержания концентрации запрещена или невозможна (в течение времени, большего, чем $T_{0\text{АПП}1}$ отсутствует приведенное напряжение);
- алгоритм поддержки концентрации находится в фазе подготовки к началу основной работы алгоритма концентрации или фазе перехода от насыщения к голоданию;
- во время перетяжки анодной рамы, если она длится более чем $T_{0\text{АПП}пер}$;
- в течение $T_{0\text{АПП}ае}$ после анодного эффекта;
- после выливки в течение времени $T_{0\text{АПП}выл}$;
- после замены в течение времени $T_{0\text{АПП}зам}$;
- в течение периода редкого питания по таймеру до и после обработки ванны.

Кроме перечисленных условий есть возможность запустить режим питания по таймеру с панели блока управления или с верхнего уровня системы. В этом случае он будет работать до тех пор, пока аналогичным образом не будет запущен другой режим работы АПП (например, алгоритм поддержки концентрации) или не произойдет автоматический переход к алгоритму поиска анодного эффекта [37].

После окончания периода питания ванны по таймеру автоматически запускается алгоритм поддержки концентрации, если он не запрещен.

Изменяемые с верхнего уровня параметры алгоритма [1, 37]:

- время перехода на питание по таймеру при отсутствии приведенного напряжения $T_{0\text{АПП}1}$;
- время перехода на питание по таймеру после начала перетяжки анодной рамы $T_{0\text{АПП}пер}$;
- время работы АПП по таймеру после анодного эффекта $T_{0\text{АПП}ае}$, после выливки $T_{0\text{АПП}выл}$ и замены $T_{0\text{АПП}зам}$;
- поддержание концентрации глинозема.

Алгоритм поддержания концентрации глинозема в электролите запускается автоматически по истечению времени питания по таймеру, если алгоритм не запрещен. Также его можно запустить вручную с панели блока управления или с верхнего уровня.

Алгоритм состоит из фазы подготовки к началу работы и трех основных фаз – голодания, насыщения и регулирования МПР (переход от насыщения к голоданию). Работа алгоритма начинается с фазы подготовки. Она заключается в работе обычного алгоритма регулирования МПР.

В течение этой стадии АПП работает по таймеру с базовой частотой $\tau_{баз}$. Стадия завершается, когда среднее за 3 минуты приведенное напряжение окажется в пределах мертвой зоны регулирования. После этого происходит автоматический переход к фазе гарантированного голодания. При этом [37]:

- АПГ работает в полтора раза реже базовой частоты;
- «мертвая зона» регулирования МПР расширяется до пределов от $(U_{цели} - U_{1конц})$ до $(U_{цели} + U_{2конц})$, причем при подаче вниз целью регулирования является не $U_{цели}$, а середина верхней части мертвой зоны $(U_{цели} + U_{2конц})/2$.

Гарантированное голодание через время $T_{гол}$ переходит в фазу нормального голодания. В этой стадии [37]:

- подачи анодной рамы осуществляются так же, как и при гарантированном голодании;
- частота работы АПГ $\tau_{гол}$ устанавливается в зависимости от производной фильтрованного напряжения. Если она отрицательна, то $\tau_{гол} = K_{гол} \cdot \tau_{баз}$, ($K_{гол}$ больше 1.5), в противном случае - $\tau_{гол} = 1.5 \cdot \tau_{баз}$.

Нормальное голодание завершается только когда производная фильтрованного напряжения станет больше заданного значения $D_{гол}$. Алгоритм переходит в фазу гарантированного насыщения, в которой [37]:

- подачи анодной рамы осуществляются так же, как и при голодании;
- АПГ работает в два раза чаще $\tau_{баз}$.

Гарантированное насыщение через время $T_{нас}$ переходит в фазу нормального насыщения. В этой стадии:

- подачи анодной рамы осуществляются так же, как и при голодании;
- АПГ работает в $K_{нас}$ раз чаще, чем базовая частота.

Нормальное насыщение заканчивается если производная фильтрованного напряжения станет равной или больше нуля. В том случае, когда если производная фильтрованного напряжения отрицательная, нормальное насыщение продолжается. Через время $T_{нас_мах}$ в этом случае включается второе нормальное насыщение до тех пор, пока производная станет равной или больше нуля. После этого алгоритм переходит в фазу регулирования МПР. В этой стадии изменяется поведение алгоритма регулирования МПР. Поддачи анодной рамы выполняются по следующим правилам [37]:

- если среднее за 3 минуты приведенное напряжение меньше нижней границы стандартной мертвой зоны $(U_{цели} - dU_{мпр})$, то выполняется подача вверх;
- если разность между средним за 3 минуты приведенным напряжением и целью управления больше $dU_{мпр}$ то выполняется подача вниз;
- АПГ работает по таймеру с базовой частотой $\tau_{баз}$;

Стадия завершается при выполнении одного из условий [37]:

- фаза длится более $T_{пер}$ (не удастся отрегулировать МПР);

– среднее за 3 минуты приведенное напряжение попадает в границы стандартной мертвой зоны;

– во время нахождения алгоритма в фазе регулирования МПР выставлен признак «Проверьте АПГ»;

Изменяемые с верхнего уровня параметры алгоритма:

– параметры изменения границ мертвой зоны регулирования при голодании и насыщении $U1_{\text{конец}}$ и $U2_{\text{конец}}$;

– коэффициент «зарезания» питания при голодании на правой ветви $K_{\text{гол}}$;

– коэффициент учащения питания при насыщении $K_{\text{нас}}$;

– производная завершения голодания $D_{\text{гол}}$;

– время гарантированного голодания $T_{\text{гол}}$ и насыщения $T_{\text{нас}}$;

– максимальное время насыщения $T_{\text{нас_мах}}$;

– максимальное время перехода от насыщения к голоданию $T_{\text{пер}}$.

2.6 АСУ ТП криолито-глиноземного расплава «СААТ»

Среди отечественных АСУ ТП КРГ наибольшее распространение и последовательное развитие получила АСУ ТП «СААТ». Самой актуальной версией на сегодняшний день является «СААТ-4» [65]. Перечислим основные особенности и функции системы.

Измерение и сглаживание напряжения и тока серии.

Измерение напряжения и тока серии производится каждые 200 мс, из которых формируется среднее значение за 1 секунду. Если из этих 5 измерений 3 являются недостоверными (напряжение меньше 2000 мВ; ток серии меньше 90 кА или больше 180 кА), то секундное значение напряжения или тока серии объявляется недостоверным. Если хотя бы одно из значений напряжения больше порога переключения устройства измерения (8000 мВ), то расчет приведенного напряжения не производится. Приведенное напряжение электролизера рассчитывается по формуле (2.1):

$$U_{\text{пр}} = \frac{(U_{\text{эл}} - E) \cdot I_{\text{ном}}}{I} + E \quad (2.1)$$

где: $U_{\text{пр}}$ – приведенное напряжение;

$U_{\text{эл}}$ – измеренное напряжение электролизера;

E – обратная ЭДС (константа 1550 мВ);

I – измеренный ток серии;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток серии (константа 158 кА для электролизеров 160 кА).

Из секундных достоверных значений напряжения, тока серии и приведенного напряжения формируются усредненные значения за 5 минут. Если достоверных значений было менее 200, то

5-минутные значения объявляются недостоверными. Приведенное напряжение за 5 минут сглаживается по алгоритму Хольта-Винтерса по формулам (2.2) (2.3):

$$U_{\Phi} = K1 \cdot U_{\text{пр}} + (1 - K1) \cdot (U_{\Phi}^{-1} + dU_{\Phi}^{-1}) \quad (2.2)$$

$$dU_{\Phi} = K2 \cdot (U_{\text{пр}} - U_{\text{пр}}^{-1}) + (1 - K2) \cdot dU_{\Phi}^{-1} \quad (2.3)$$

где U_{Φ} – фильтрованное напряжение за текущий период;

U_{Φ}^{-1} – фильтрованное напряжение за предыдущий период;

dU_{Φ} – фильтрованное приращение напряжения за текущий период;

dU_{Φ}^{-1} – фильтрованное приращение напряжения за предыдущий период;

$U_{\text{пр}}$ – приведенное напряжение за текущий период;

$U_{\text{пр}}^{-1}$ – приведенное напряжение за предыдущий период;

$K1$ и $K2$ – коэффициенты сглаживания (0...1).

Если выполняются следующие условия (2.4) (2.5):

$$|U_{\text{пр}} - U_{\Phi}^{-1} - 2dU_{\Phi}^{-1}| > A1 \quad \text{и} \quad (2.4)$$

$$|U_{\text{пр}} - U_{\Phi}^{-1}| > A2 \quad \text{где} \quad (2.5)$$

$A1$ и $A2$ – пороговые значения «скачка» напряжения ($A1$ – 20 мВ, $A2$ – 10 мВ) то производится присвоение (2.6) (2.7):

$$U_{\Phi} = U_{\text{пр}} \quad (2.6)$$

$$dU_{\Phi} = U_{\Phi}^{-1} \quad (2.7)$$

Если это условие повторяется 3 раза подряд, то производится присвоение (2.8):

$$dU_{\Phi} = 0 \quad (2.8)$$

Регулирование напряжения

Целью алгоритма является поддержание приведенного напряжения электролизера в соответствии с целевым напряжением. Целевое напряжение электролизера – это заданное напряжение плюс добавки напряжения.

Добавки к заданному напряжению используемые в алгоритмах управления:

- 1) после выливки металла;
- 2) при нестабильности электролизера;
- 3) после замены анодов;
- 4) после перестановки анодных штырей;
- 5) между выливками;
- 6) при обработке электролизеров;
- 7) пускового электролизера;

8) временная добавка.

Для принятия решения о необходимости регулирования применяется приведенное напряжение, усредненное за 5 минут. Если это значение находится вне зоны нечувствительности регулирования ($40 \text{ мВ} + 30\%$ от уровня шумов), то рассчитывается необходимое время для перемещения анодного массива. Для расчета времени перемещения используется «коэффициент регулирования» – количество милливольт за единицу времени, определяется по формуле (2.9):

$$T_{\text{рег}} = \frac{U_{\text{цел}} - U_{\text{пр}}}{K} + dT \quad (2.9)$$

где $T_{\text{рег}}$ – рассчитанное время регулирования;

$U_{\text{цел}}$ – целевое напряжение электролизера;

$U_{\text{пр}}$ – приведенное напряжение;

K – коэффициент регулирования;

dT – время люфта двигателей при изменении направления движения (1 сек).

Если рассчитанное время больше минимального времени перемещения анода, то выдается команда на включение двигателей. Максимальное время перемещения – 10 секунд. После регулирования осуществляется оценка разницы между рассчитанным и реальным изменением напряжения. Если реальное изменение больше рассчитанного, то «Коэффициент регулирования» увеличивается на 1 единицу, если меньше – уменьшается. Корректировка коэффициента не производится:

- 1) если реальное изменение больше максимального установленного значения (25 мВ/сек) – выводится сообщение «Непропорциональное изменение напряжения»;
- 2) если реальное изменение меньше минимального установленного значения (5 мВ/сек) – выводится сообщение «Неэффективное перемещение анода»;
- 3) если реальное изменение противоположно по знаку рассчитанному – сообщение «Обратный эффект регулирования» Если одно из этих условий повторяется подряд 3 раза, то формируется сообщение «Управление отключено» и на электролизере запрещается дальнейшее регулирование напряжения.

Автоматическое регулирование не производится при:

- 1) наличии «Запрета регулирования»;
- 2) положении ключа управления не в положении «Автомат»;
- 3) недостоверном напряжении электролизера;
- 4) недостоверном токе серии;
- 5) низком или высоком приведенном напряжении электролизера (целевое напряжение $\pm 500 \text{ мВ}$);

- 6) анодном эффекте и в течение 30 минут после анодного эффекта;
- 7) при прогнозе анодного эффекта (запрещается регулирование вниз);
- 8) отклонении тока серии от номинального более чем на 10 кА;
- 9) электролизер работает с АПГ в режиме питания по концентрации и находится не в режиме «номинал».

Управление при выливке металла.

Целью алгоритма является поддержание постоянным межполюсного расстояния при выливке металла из электролизера и сохранение теплового баланса между циклами выливки. Управление напряжением электролизера при выливке металла инициируется при переключении ключа управления в положение «выливка». Приведенное напряжение в этот момент времени является базовым напряжением для управления. Анализ напряжения производится каждую 1 секунду. При возрастании напряжения более чем на 200 мВ включаются двигатели для перемещения анодного массива вниз. Отключение двигателей производится при достижении базового напряжения или максимального времени перемещения анодного массива. По завершении режима выливки к базовой уставке напряжения прибавляется «Добавка после выливки» +100 мВ на 30 минут. После снятия «Добавки после выливки» устанавливается «Добавка между выливками».

Измерение напряжения и тока серии.

Сигнал тока серии поступает в концентратор данных в виде частотного сигнала. Частота 10кГц соответствует максимальному значению тока серии. Измерение тока серии производится счетчиком импульсов. Значения счетчика каждые 100 мс по шине PROFIBUS-DP передаются в шкафы управления. Полученные значения усредняются за 1 секунду. Если 1-секундные значения тока серии меньше нижнего предела измерения или больше верхнего предела измерения, то они объявляются недостоверными. Измерение напряжения электролизера и анодного массива производится каждые 100 мс модулем аналогового ввода с периодом интеграции 20 мс. Из этих значений формируются средние значения за 1 секунду. Если 2/3 измерений являются недостоверными (напряжение электролизера меньше нижнего предела измерения напряжения, напряжение анодного массива меньше нижнего предела напряжения анода или больше верхнего предела измерения анода), то секундные значения объявляются недостоверными.

Для синхронизации измерений тока серии и напряжения электролизера используется параметр «задержка измерения тока серии». Если в течение 10 секунд значение напряжения является недостоверным, а ток серии достоверным, то формируется сообщение «Нет измерения напряжения». Приведенное напряжение электролизера рассчитывается по формуле (2.10):

$$U_{\text{пр}} = \frac{(U_{\text{эл}} - E)}{I} \cdot I_{\text{ном}} + E \quad (2.10)$$

где $U_{\text{пр}}$ – 1-секундное приведенное напряжение;

$U_{\text{эл}}$ – 1-секундное усредненное напряжение электролизера;

I – 1-секундное усредненный ток серии;

E – константа обратной ЭДС;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток серии (уставка «Ном. ток серии»).

Если хотя бы одно из значений напряжения больше напряжения анодного эффекта или значения напряжения или тока серии являются недостоверными, то расчет приведенного напряжения не производится.

Приведенное напряжение анодного массива рассчитывается по формуле (2.11):

$$U_{\text{ан.пр.}} = \frac{U_{\text{ан.}}}{I} \cdot I_{\text{ном}} \quad (2.11)$$

где $U_{\text{ан.пр.}}$ – приведенное напряжение анодного массива;

$U_{\text{ан.}}$ – измеренное напряжение анодного массива;

I – измеренный ток серии;

$I_{\text{ном}}$ – номинальный ток серии (уставка «Ном.ток серии»).

Если значения напряжения анодного массива или тока серии являются недостоверными, то расчет приведенного напряжения анодного массива не производится. Из секундных достоверных значений напряжений, тока серии и приведенных напряжений формируются усредненные значения за 1 минуту. Если достоверных значений было менее 2/3, то 1-минутные значения объявляются недостоверными и формируются соответствующие сообщения: «Недостоверное напряжение», «Недостоверное напряжение анода», «Недостоверный ток серии». Во время регламентных операций по проверке канала измерения тока серии, при подключении образцовых источников частотного сигнала, необходимо устанавливать запрос «Проверка тока серии». При установленном запросе приведенные значения напряжения электролизера и анодного массива объявляются недостоверными.

Контроль измерений тока серии и напряжения.

Если более чем с половины шкафов управления корпуса пришло недостоверное пятиминутное значение тока серии (0 кА), при этом напряжение электролизеров меньше 1800 мВ, то диагностируется снятие технологической нагрузки серии, и формируется подтверждаемое сообщение «Внимание! Снята технологическая нагрузка». При этом кнопка соответствующего корпуса в системе визуализации «ЭлВИС» окрашивается в темно-зеленый цвет. После восстановления достоверности тока серии на половине шкафов корпуса формируется сообщение «Техн. нагрузка восстановлена». После восстановления технологической нагрузки для

предотвращения зажатия на всех электролизерах корпуса автоматически устанавливается «Запрет регулирования». Время действия запрета определяется продолжительностью снятия нагрузки, умноженной на заданный коэффициент, но не менее 10 минут и не более 30-минут. Если запрет был установлен до того, как было снятие технологической нагрузки, то запрет автоматически не снимается. Каждые два часа производится анализ архивных значений приведенного напряжения анода. Если среднеквадратичное отклонение этих напряжений превышает пороговое значение или больше $1/3$ имеют нулевое значение, то формируется сообщение «Проверить измеренное напряжение анода».

2.7 Иностранные АСУ ТП криолито-глиноземного расплава

АСУ ТП APC+ (Advanced Process Control) швейцарской компании MetsoI представляет собой современную систему управления алюминиевыми электролизными ваннами, разработанную как модернизационное решение для действующих электролизных линий. Основная цель внедрения APC+ – обеспечить одновременное повышение технико-экономических показателей (выход по току, удельный расход электроэнергии) и снижение углеродного следа за счёт уменьшения частоты и длительности анодных эффектов, а также оптимизации режимов питания глиноземом и дозирования AlF_3 .

Ограничения традиционных (устаревших) систем управления ваннами.

Значительная часть электролизных линий, введённых до 2010 г., продолжает эксплуатироваться с системами управления, архитектурно и алгоритмически сформированными в 1980 – 1990-х гг, таких как Alpsys, Celtrol, Токсофт, а также различные проприетарные решения на базе микропроцессоров. Для таких систем характерны следующие принципиальные ограничения:

- жесткая логика управления питанием: подача глинозема часто основана на фиксированных временных циклах или на пороговых условиях по напряжению/сопротивлению, причем входные сигналы усредняются на длительных интервалах (типично 60 – 300 с). Это снижает чувствительность к быстрым возмущениям процесса и приводит к запаздыванию корректирующих воздействий;
- «унифицированный» подход к электролизным ваннам: практикуется стратегия «один алгоритм для всех ванн», при которой фактическое состояние конкретной ванны, ее недавняя история и особенности поведения учитываются ограниченно. Такая жесткость способствует чередованию режимов перепитки и недопитки;
- ограниченные вычислительные ресурсы и низкая частота измерений: устаревшие контроллеры не рассчитаны на высокочастотный сбор данных, комплексную обработку сигналов и применение адаптивных/предиктивных моделей. В результате значимая

динамика процесса (например, ранние признаки нестабильности под анодами) может интерпретироваться слишком поздно;

- слабая интеграция с современными SCADA и аналитическими контурами: визуализация, аварийная сигнализация и экспорт данных часто ограничены, что усложняет построение сквозной цифровой аналитики, производственного мониторинга и подготовки данных для отчетности по выбросам.

Именно эти ограничения рассматриваются как ключевая причина того, что традиционные системы управления оказываются недостаточно точными для современных требований по энергоэффективности и экологическим показателям.

Архитектурные отличия APC+: переход к распределенному управлению на базе ПЛК.

Главное концептуальное отличие APC+ заключается в архитектуре управления: система построена на ПЛК и реализует распределенное принятие решений на уровне каждой ванны. Такой подход обеспечивает:

- непрерывность управления при нарушениях связи: каждая ванна сохраняет работоспособность даже при сбоях коммуникаций или недоступности верхнего уровня (SCADA), т.е. поддерживается автономный режим с локальным буфером данных и последующей синхронизацией;
- снижение зависимости от централизованных вычислительных узлов и уменьшение задержек реакции за счет обработки данных «на периферии» непосредственно у ванны;
- упрощение сопровождения: эксплуатационный персонал получает возможность работать с логикой на уровне ПЛК в привычной промышленной среде, без критической зависимости от узкоспециализированных разработчиков устаревших платформ.

Таким образом, APC+ отличается от прежних систем не только алгоритмами, но и базовой инженерной философией: от централизованной, и часто плохо масштабируемой логики – к автономным контроллерам, устойчивым к отказам и пригодным для поэтапной модернизации действующих линий.

Алгоритмические и функциональные преимущества APC+ по сравнению с устаревшими решениями

- 1) Подача глинозема «по потребности» на основе наклона сопротивления.

Вместо таймеров и усредненных порогов напряжения APC+ использует наклон (скорость изменения) электрического сопротивления ванны как оперативный индикатор текущего спроса на глинозем. Управляющее воздействие формируется на основании анализа тренда сопротивления до и после пробивки корки и подачи материала. За счет этого система определяет момент подачи и дозу, стремясь поддерживать электролит вблизи оптимального насыщения и снижать вероятность анодного эффекта.

Ключевое отличие от устаревших подходов – динамическая подстройка цикла питания под фактическое состояние ванны, а не работа по predetermined расписанию.

2) Синхронизированная последовательность «пробивка – подача».

АСУ ТП имеет усовершенствованную последовательность пробивки корки и подачи глинозема: пробивка инициируется по состоянию ванны, а подача выполняется после подтверждения факта вскрытия корки. При этом отверстия остаются закрытыми вне актов подачи, что способствует прогреву глинозема газами (теплотой ванны) и ускоряет растворение, поддерживая тепловой баланс и снижая риск образования осадков.

В устаревших системах пробивки и подачи нередко выполняются периодически либо по командам оператора, без столь строгой увязки с текущим состоянием ванны и без подтверждения качества выполнения операции.

3) Высокочастотный сбор данных и многополосный анализ «шума».

АРС+ реализует повышенную частоту измерений (20 мс для напряжения и 1 Гц для тока), что качественно превосходит типичные интервалы измерений в традиционных системах. Это позволяет фиксировать быстрые и малозаметные возмущения (перемещения балки, деформации корки, признаки газовой пленки под анодами и др.).

Принципиальной особенностью является разложение сигналов по частотным диапазонам: низкочастотная, высокочастотная и ультравысокочастотная составляющие используются как диагностические признаки состояния ванн. Данные шумы возникают из-за колебаний металла, и вероятными проблемами установки или срыва анода. В устаревших системах подобная аналитика, как правило, отсутствует, а высокочастотные компоненты часто подавляются фильтрацией как «помехи».

4) Предиктивное предотвращение и адаптивное прекращение анодных эффектов.

Классические алгоритмы прекращения анодного эффекта часто срабатывают по жесткому порогу напряжения (пример порядка 8 В), то есть уже после развития события. АРС+ применяет предиктивную логику: оценивается наклон сопротивления и рост высокочастотной составляющей, а также реакция электролизной ванны на подачу. При достижении сочетаний критериев система способна инициировать упреждающие действия (например, дополнительные пробивки и подачу глинозема), а при наступившем анодном эффекте – выполнять адаптивную процедуру прекращения, изменяя число пробивок, дозу и паузы с учетом истории поведения конкретной электролизной ванны.

С практической точки зрения это означает переход от «реактивного» управления к упреждающему, что непосредственно влияет на сокращение длительности и тяжести анодных эффектов.

5) Динамическое дозирование AlF_3 .

APC+ обеспечивает динамическую корректировку дозирования AlF_3 по данным трендов сопротивления, отклика на питание и (в отдельных случаях) по косвенным признакам температурного режима. В устаревших системах дозирование AlF_3 часто является постоянным либо слабо привязанным к реальному состоянию электролита, что повышает риск избыточного расхода реагента и ухудшения устойчивости электролита.

б) SCADA/HMI, удаленная наблюдаемость и киберустойчивость.

Система предусматривает интеграцию с верхним уровнем SCADA/HMI: визуализацию состояния ванн, тренды, аварийные сообщения и показатели эффективности (KPI), включая возможность мобильного доступа и удаленной поддержки оптимизации. При этом подчеркивается, что APC+ сохраняет функциональность при отказах сети или SCADA (т.е. возможна автономная работа), ведет локальные журналы действий и синхронизирует данные после восстановления связи. Обмен данными осуществляется по защищенным линиям связи и сегментирован по ролям.

Программа испытаний АСУ ТП APC+ запланирована на 2022 – 2025 гг. По состоянию на июнь 2023 достигнуты следующие результаты пилотных внедрений на трех предприятиях. Методика включала сбор базовых данных при работе старой системы (3 – 4 недели), поэтапную активацию адаптивной логики (6 – 8 недель) и период стабилизации/оптимизации (2 – 3 месяца).

Достигнуты следующие эффекты:

КАР (Черногория, 90 кА, AP-7): рост выхода по току с 92,8% до 93,3%; снижение удельного расхода электроэнергии с 13,65 до 13,45 МВт·ч/т Al; уменьшение частоты анодных эффектов с 0,44 до 0,31 АЭ/ванна·сутки и резкое снижение интегрального показателя «длительность/перенапряжение».

ALUCAM (Камерун, 135 кА, AP-СМ): рост выхода по току с 85,98% до 88,52%; снижение удельного расхода электроэнергии с 15,40 до 14,92 МВт·ч/т Al; уменьшение частоты АЭ с 2,61 до 1,81 АЭ/ванна·сутки и существенное сокращение показателя «длительность/перенапряжение».

VALCO (Гана, 145 кА, Kaiser P-69): рост выхода по току с 87,45% до 91,43%; снижение удельного расхода электроэнергии с 15,38 до 14,66 МВт·ч/т Al; при умеренном снижении частоты АЭ отмечено значительное сокращение длительности/перенапряжения. При этом часть событий АЭ была связана с механическими/электрическими нарушениями, однако APC+ ограничивал тяжесть событий за счет быстрого реагирования.

По результатам испытаний система обеспечивает повторяемые улучшения по энергоэффективности и устойчивости процесса, а также заметное снижение анодных эффектов. Типовые эффекты: увеличение выхода по току более чем на 1%, сокращение удельного расхода энергии более чем на 0,2 МВт·ч/т и снижение частоты АЭ более чем на 50% в ряде условий.

Экологическая значимость отличий APC+ от устаревших систем

Снижение выбросов обеспечивается двумя механизмами:

- 1) сокращение выбросов ПФУ (CF_4 , C_2F_6) за счет уменьшения частоты и длительности анодных эффектов;
- 2) снижение косвенных выбросов вследствие уменьшения потребления электроэнергии.

Суммарный эффект может составлять порядка 1,0 – 6,5 т CO_2 -экв/т первичного алюминия без капиталоемких изменений инфраструктуры и без замены сырья.

Отличия подхода к внедрению и управлению рисками

Существенным практическим отличием APC+ от многих модернизаций «жесткой заменой» является поэтапная стратегия внедрения и встроенные механизмы снижения риска:

Сопоставление APC+ с устаревшими системами управления показывает, что ключевые отличия заключаются в переходе от фиксированных, слабо адаптивных алгоритмов к управлению на основе оперативной обратной связи по наклону сопротивления; от низкочастотного измерения и «сглаженной» интерпретации состояния ванны – к высокочастотному сбору данных и многополосной диагностике сигналов; от реактивного подавления анодных эффектов – к предиктивному предотвращению и адаптивному прекращению; от централизованной и уязвимой к отказам архитектуры – к распределенному ПЛК – управлению с автономной работой ванны и интеграцией с современными SCADA/HMI. В совокупности эти отличия формируют технологическую основу для повышения выхода по току, снижения удельного расхода энергии и сокращения выбросов, что подтверждается промышленными испытаниями.

2.8 Выводы по Главе 2

Системы АСУ ТП электролиза алюминия, разработанные после 2000 годов, такие как «СААТ-4», «ТРОЛЛЬ», «ЭЛЕКТРА» и применяемые на отечественных алюминиевых заводах, позволили достичь показателей выхода по току от 90% и выше. Дальнейшее увеличение выхода по току требует изменение конструкции электролизеров (переход на инертный анод), увеличения числа автоматически собираемых параметров. В настоящее время технологические параметры за исключением тока серии и напряжения на ванне собираются раз в сутки, что является недостаточным для оперативного управления по возмущениям.

Недостатком существующих АСУ ТП электролиза алюминия является ограниченное число непосредственно измеряемых технологических параметров. В современных научных исследованиях намечен тренд на создание АСУ ТП, учитывающих показания от «виртуальных» датчиков, реализуемых на основе нейросетевых моделей, обученных на массиве архивных технологических данных.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

3.1 Методика экспериментальных исследований

3.1.1 Описание лабораторной установки по электролизу криолито-глиноземных расплавов

Экспериментальные исследования по электролизу криолито-глиноземных расплавов проводились в Научном центре Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов на установке для электролиза расплавов и испытания материалов в условиях электролиза, разработанной в ООО «НТЦ Элтер», см. рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Установка для электролиза расплавов и испытания материалов в условиях электролиза. Источник: материалы автора

В состав установки входят шахтная печь с подъемным столом для тигля, подвижная платформа крепления токоподводов, с механизмом контроля глубины погружения анода (регулирование МПР), гибкий рукав системы вентиляции, а также стойка управления, состоящая из шкафа автоматики и силового шкафа.

Система автоматики установки состоит из следующий элементов:

- 1) программируемого реле ОВЕН ПР200-24.4.1.0;
- 2) модуля аналогового ввода с универсальными входами (AI) ОВЕН МВ110-224.8А;
- 3) преобразователя интерфейсов RS-485 <-> USB с гальванической изоляцией ОВЕН АС4-М;
- 4) двух драйверов шаговых двигателей SMC 8008 для точного позиционирования подвижной платформы с токоподводами по вертикали;
- 5) драйверов шаговых двигателей 2DM860H и 2DM556 для вращения образца электрода.

В состав силового шкафа входят:

- 1) блок питания EDR-150-24, выходное напряжение постоянного тока 24 В, номинальный ток 6,5 А;
- 2) блок питания MEAN WELL LRS-600-48, выходное напряжение постоянного тока 48 В, номинальный ток 12,5 А, мощность 600 Вт;
- 3) блок питания MEAN WELL HDR-60-12, 12 В, 4.5 А, 54 Вт;
- 4) тиристорный регулятор мощности ТРМ-3М-30 RS485, для плавного регулирования мощности трехфазной нагрузки;
- 5) высокочастотный инверторный выпрямитель ООО «ПП» ГОЛДСТЕГ» UNIV-100А/12В, ток 0 – 100 А, напряжение 0 – 12 В, является источником постоянного тока для процессов электролиза;
- 6) трансформатор ООО «ЗСО «КАВИК», ТС 6,0У2/380/12, мощность 6,0 кВА, сторона высокого напряжения 380 В, 9,1 А, сторона низкого напряжения 12 В, 288,6 А, число фаз: 3 – для нагревателя шахтной печи;
- 7) преобразователь частоты ОВЕН ПЧВ1-К75-А, для управления электродвигателями максимальной мощностью 0,75 кВт, максимальный выходной ток 4,0 А, входное напряжение 220 В – используется для управления двигателем подъемного стола шахтной печи.

Подвижная платформа крепления токоподводов содержит шаговый двигатель ST57-100D с двумя валами (NEMA 23), а также Leadshine 57CM23-FS (NEMA 23).

Измерение температуры электролита осуществляется при помощи термопары ООО «НПО Спутник», КТ-105/3/ХА(К)/-40...1000/Кл.1, хромель-алюмель, диапазон измеряемых температур от -40 до +1000 °С.

Контроль крайних положений подъемного стола осуществляется при помощи индуктивных датчиков приближения LJ12A3-4-Z/AУ PNP NC.

Для защиты графитового тигля от окисления во время электролиза шахтная печь продувается аргоном с объемным расходом 2 л/мин.

Управление установкой осуществляется с ПК при помощи SCADA от компании OVEN, окно программы представлено на рис. 3.2. SCADA – система обладает следующими функциями:

- настройка уставок температуры шахтной печи, целевого тока, глубины погружения электрода, скорости вращения электрода;
- отображение измеренного тока, напряжения в лабораторной ячейке, текущей температуры в шахтной печи, а также температуры с термопары ХА, погруженной в электролит;
- запись подсыпок в электролит (название, масса), добавление комментариев;
- отображение графика напряжения, тока, температуры;
- настройка допуска температуры, тока и напряжения для звуковой сигнализации в случае выхода за указанный диапазон значений;
- формирование отчета по эксперименту в формате файлов *xlsx*;
- функция аварийной остановки эксперимента (снятия тока с установки).

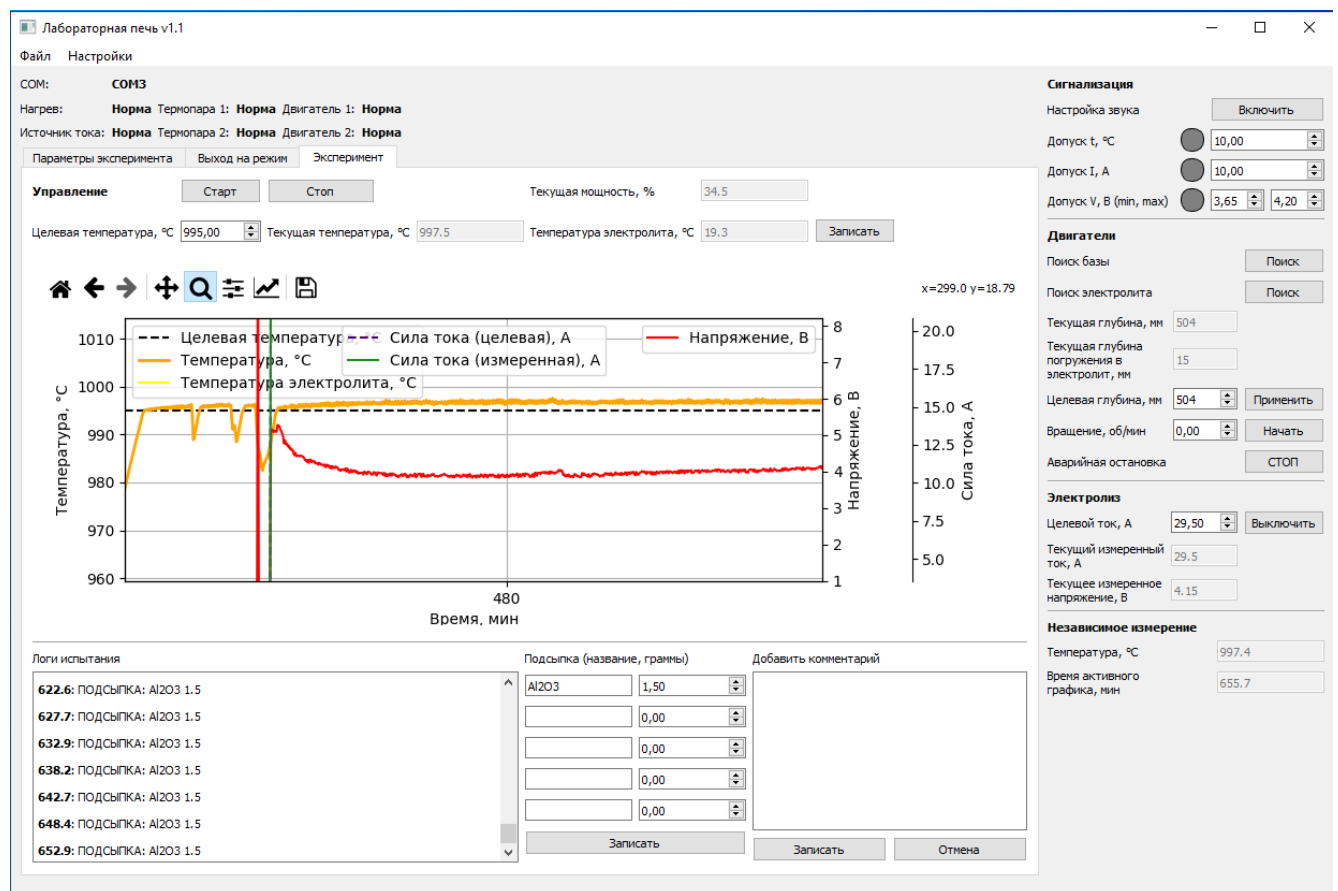


Рисунок 3.2 – Окно программы SCADA – системы установки для электролиза расплавов и испытания материалов в условиях электролиза. Источник: материалы автора

3.1.2 Схема лабораторной ячейки

Лабораторная ячейка для электролиза криолито-глиноземного расплава представляет собой шахтную печь, внутри которой находится стальной защитный стакан, расположенный на подъемной металлической площадке, которая является токоподводом для катода. В стакан вставлен графитовый тигель, в который в свою очередь вставлено изолирующее корундовое кольцо. Таким образом именно дно графитового тигля является катодом, см. рис. 3.3. Над поверхностью электролита размещалась керамическая трубка для подачи глинозёма. В трубке фиксировалась лабораторная воронка из боросиликатного стекла, а сверху устанавливался шнековый питатель, входящий в систему АПГ.

Состав электролитической ванны и концентрация оксида алюминия 2,5% по массе поддерживались с помощью лабораторной системы автоматической подачи. Для защиты от окисления графитового тигля и части анода, выступающей над поверхностью электролитической ванны, рабочее пространство печи продувалось аргоном со скоростью 2 л/час.

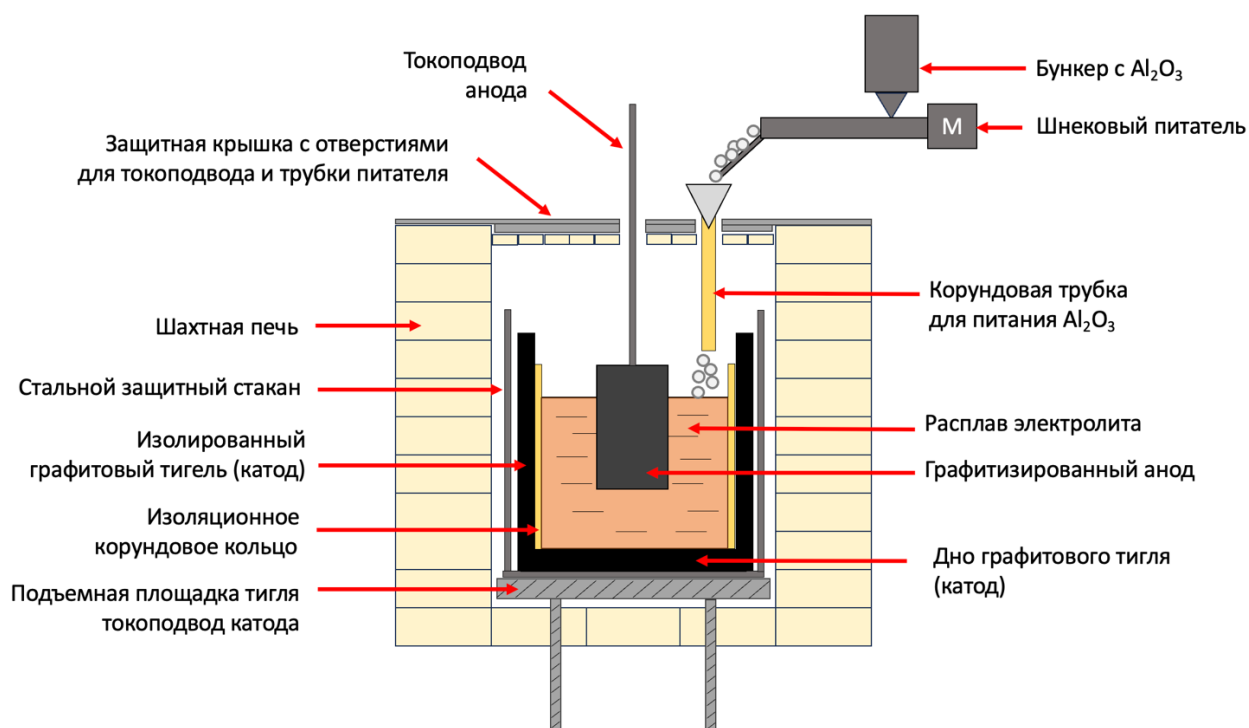


Рисунок 3.3 – Схема лабораторной ячейки. Источник: составлено автором.

3.1.3 Подготовка материалов и лабораторной ячейки к эксперименту по электролизу

В качестве материала анода использовался графитизированный электрод, изготовленный из нефтяного кокса высшей марки UHP (Ultra-High Power) см. рис. 3.4. Данный материал привлекателен тем, что имеет низкое удельное электрическое сопротивление (6,4 – 8,8 мкОм·м). Измерение удельного сопротивления образца электрода в зависимости от температуры представлены в следующем разделе работы.

Размеры цилиндрического анода:

$d = 50 \text{ мм};$

$h = 50 \text{ мм}.$

Для крепления анода к токоподводящей металлической штанге в электроде было просверлено отверстие диаметром 5 мм, после чего метчиком нарезана резьба М6. Затем анод навинчивался на токоподводящую штангу, закреплённую на верхней платформе электролизной установки. Далее следовала процедура центровки стенок графитового тигля относительно анода, см. рис. 3.5.

Перед началом электролиза анод помещался в шахтную печь в верхнюю зону над расплавом, где осуществлялся его плавный прогрев с целью предотвращения трещинообразования.

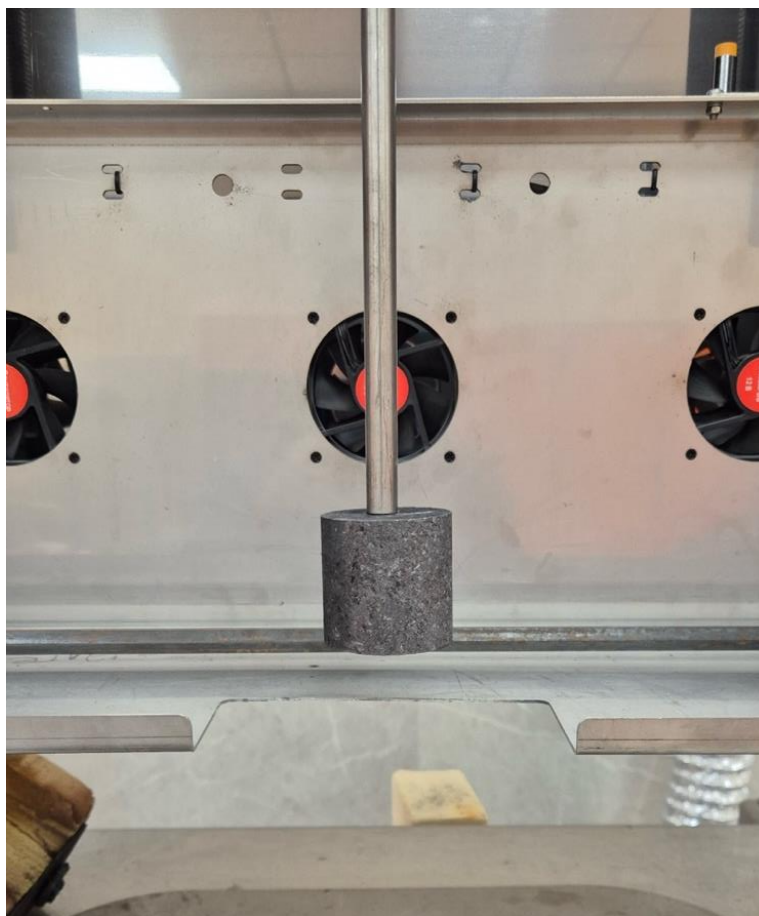


Рисунок 3.4 – Графитизированный анод из нефтяного кокса, закрепленный на токоподводе.

Источник: материалы автора.



Рисунок 3.5 – Процедура центровки стенок графитового тигля относительно анода. Источник: материалы автора.

В качестве катода использовалось дно графитового тигля. Глубина тигля 160 мм, внешний диаметр 140 мм, внутренний диаметр 100 мм. Боковые поверхности тигля изолировались от тока при помощи высокотемпературного корундового кольца.

Изоляционное корундовое кольцо было изготовлено из корундового тигля, для этого дно тигля было отрезано на станке с алмазным диском. Изоляционное кольцо имеет следующие характеристики: содержание Al_2O_3 99,7%, открытая пористость менее 0,01 %, максимальная температура использования 1750 °С.

- внешний диаметр $d_{\text{внешн}} = 95$ мм;
- внутренний диаметр $d_{\text{внутр}} = 85$ мм;
- начальная масса $m_{\text{нач}} = 491,35$ г.

Перед использованием в лабораторной ячейке корундовое кольцо было подготовлено следующим образом: кольцо было помещено в камерную электропечь ТУЛА-ТЕРМ СНО-17 при температуре 105 °С на 120 минут, чтобы удалить влагу. Далее изоляционное кольцо было помещено в графитовый тигель, при этом режим нагрева шахтной печи во время электролиза составлял 5 °С/мин во избежание образования трещин.

Для проведения эксперимента по электролизу подготавливалась смесь электролита с $KO = 2,4$, т.е. смесь с содержанием AlF_3 45,45% и NaF 54,55% по массе. Плотность электролита 2,16 г/см³. Смесь электролита наплавлялась в шахтной печи ТУЛА-ТЕРМ СШОЛ-10/11 при температуре 1050 °С. Использовались следующие реактивы:

- алюминий фтористый 99,00% (степень чистоты «Ч»), ТУ 6-09-1122-84, производитель «УниХим», Россия.
- натрий фтористый 99,00% (степень чистоты «Ч.Д.А.»), ГОСТ 4463-76, производитель «Сигма Тек», Россия.

Взвешивание компонентов электролита осуществлялось лабораторными весами МАССА-К, модель ВК-3000.1 со следующими характеристиками: минимальная нагрузка 2,5 г, максимальная нагрузка 3000 г, дискретность отсчета 0,05 г, класс точности II, пределы допускаемой погрешности в интервалах взвешивания:

- от 2,5 г до 500 г включительно: ± 50 мг;
- свыше 500 г до 2 кг включительно: ± 100 мг;
- свыше 2 кг до 3 кг включительно: ± 150 мг.

Для питания лабораторной ячейки использовался глинозем марки Г-00 (ГОСТ 30558-98), производитель АО «РУСАЛ Бокситогорский глинозем», состав глинозема см. в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики современных алюминиевых электролизеров ОК РУСАЛ.

Источник: паспорт глинозема марки Г-00

№ п/п	Наименование показателя	Норма ГОСТ 30558-98	Результат анализа
1.	Внешний вид	Кристаллический гигроскопичный порошок без посторонних включений, технологически не связанных с производством	Соответствует
2.	Массовая доля оксида железа (Fe_2O_3), %	0,03	0,02
3.	Массовая доля оксида кремния (SiO_2), %	0,02	0,01
4.	(Na_2O+K_2O) в пересчете на Na_2O	0,4	0,3
5.	Массовая доля оксида цинка (ZnO)	0,01	0,01
6.	Потеря массы при прокаливании (300 – 1100 °С)	1,2	0,7
7.	Влага	2,5	0,5
8.	$\alpha - Al_2O_3$	–	20

Примеси – оксидов титана, ванадия, хрома, марганца и фосфора – гарантируются по ГОСТ 30558-98.

За 4 часа до начала эксперимента глинозем помещали в камерную электропечь ТУЛА-ТЕРМ СНО-17 при комнатной температуре и нагревали со скоростью 500 °С/ч до 400 °С. После достижения заданной температуры материал выдерживали в течение двух часов для удаления поверхностной влаги, после чего охлаждали до 30 °С и загружали в бункер шнекового питателя.

Процедура подготовки установки для электролиза расплавов включала: подключение баллона с аргоном к армированному шлангу, подводящему газ в шахтную печь, зачистку от окалины металлической подъемной площадки печи (катода) и стального стакана, монтаж токоподвода с анодом, центровку графитового тигля относительно анода, а также предварительный нагрев шахтной печи с установленным в ней тиглем с электролитом до температуры 500 °С за день до эксперимента.

Завершение эксперимента осуществлялось в следующей последовательности: отключение тока в SCADA – системе, прекращение подачи глинозема и демонтаж системы АПГ, отключение проводов АЦП от токоподводов, открытие крышки печи, подъем анода (включение функции «поиск базы» в SCADA), отключение нагрева, подъем площадки печи с металлическим защитным стаканом и тиглем. Далее с помощью металлургических круглых щипцов стакан поднимался с площадки печи, затем электролит с алюминием переливался в другой стакан для охлаждения и выдерживался до полного затвердевания. После охлаждения и затвердевания электролита застывший алюминий извлекался путем его дробления, после чего измерялась масса образца для последующего расчета выхода по току.

3.1.4 Шнековый питатель системы АПГ

Управление шнеком, имеющем в составе шаговый двигатель Nema-23 осуществлялось при помощи микроконтроллера ATmega328, драйвера шагового двигателя TB-6600 (9 – 42 В, 0,3 – 4А, до 6400 шагов/оборот). В качестве источника питания шагового двигателя использовался лабораторный блок питания NicePower 30V-10 А SPS3010, см. рис. 3.6. Корпус шнека спроектирован в программе SolidWorks и напечатан из ABS пластика на 3d принтере ELEGOO NEPTUNE. В пластиковый корпус вставлен металлический шнек длиной 300 мм, закрепленный к валу шагового двигателя через стальную гибкую муфту. Программа для управления АПГ написана на языке C++ (см. Приложение В).

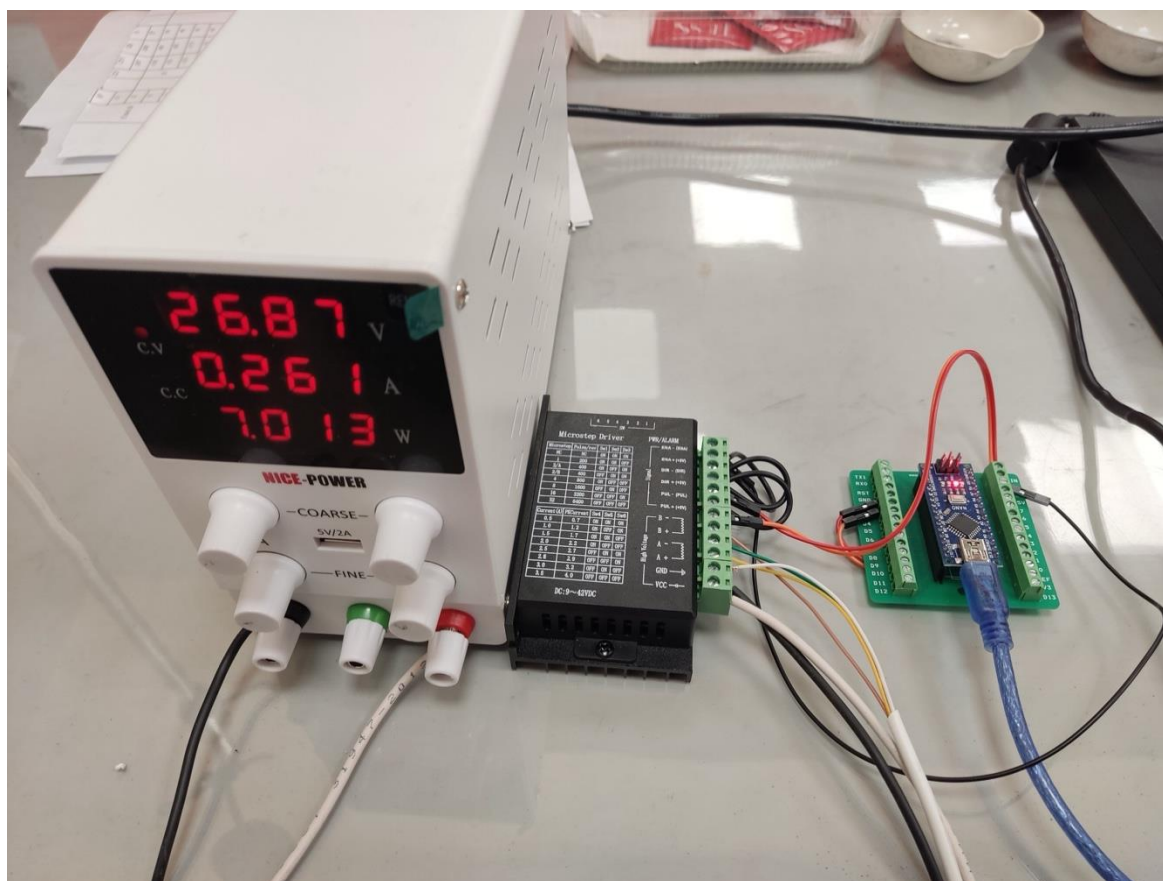


Рисунок 3.6 – Микроконтроллер и драйвер шагового двигателя шнекового питателя. Источник: материалы автора

Конструкция питателя с бункером для глинозема монтируется на портативную платформу из алюминиевого профиля, с возможностью регулирования высоты размещения питателя. Вся конструкция размещается на верхней крышке печи электролизной установки, см. рисунок 3.7.

Калибровка подаваемой порции глинозема выполнялась перед началом эксперимента следующим образом: на микроконтроллер подавала команда: выполнить 1 полный оборот вала шагового двигателя, т.е. 6400 шагов. Поступившая доза Al_2O_3 взвешивалась на лабораторных весах ВК-3000.1 и делилась на 6400 шагов двигателя. В итоге 1 шагу двигателя соответствовало определенное значение грамм глинозема. Данный коэффициент записывался в код программы. По результатам экспериментальных исследований установлено, что средняя относительная погрешность шнекового питателя составляет 0,84 %, при этом максимальная относительная погрешность не превышает 3,5 %.

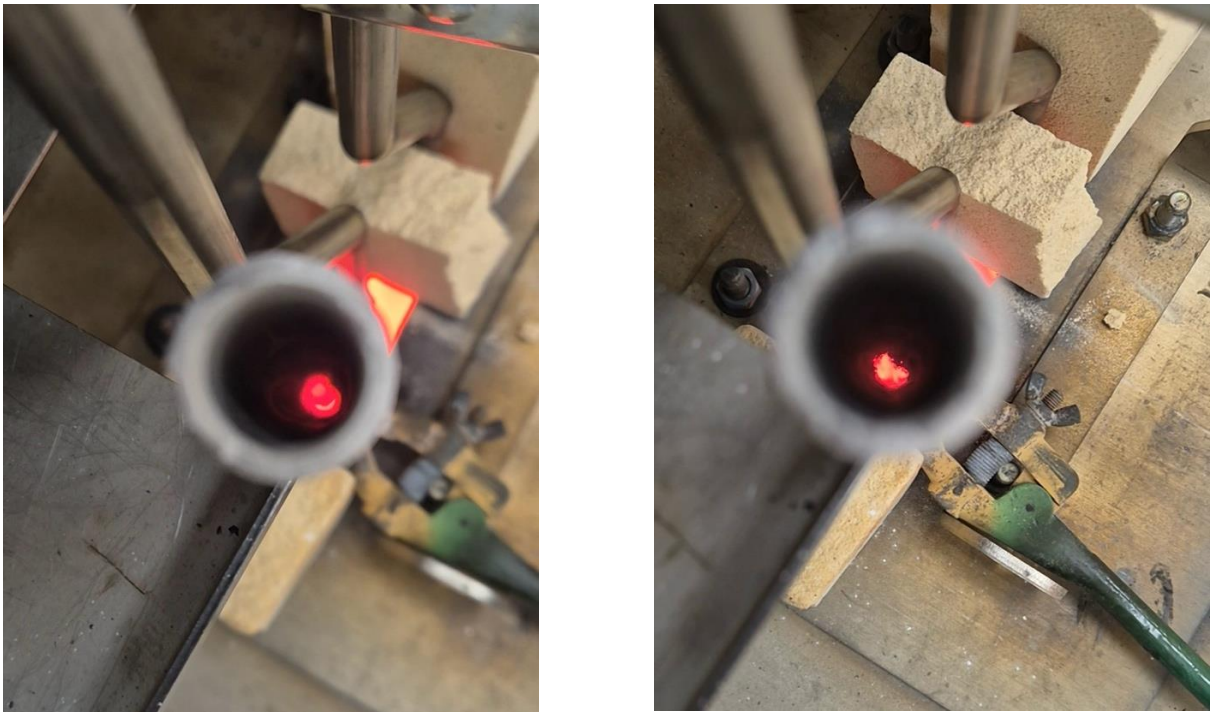


Рисунок 3.7 – Конструкция шнекового питателя.

Источник: материалы автора

Высокотемпературная корундовая трубка для подачи Al_2O_3 в лабораторную ячейку имеет следующие характеристики: содержание Al_2O_3 99,7%, открытая пористость менее 0,01 %, максимальная температура использования 1750 °С, длина 500 мм, диаметр внешний 18 мм, диаметр внутренний 14 мм.

Во время эксперимента каждый час подающая трубка для глинозема проверялась на наличие засорения смесью глинозема с парами электролита и при необходимости очищалась металлическим прутком диаметром 2 мм, см. рис. 3.8.



а)

б)

Рисунок 3.8 – Подающая трубка: а) чистая; б) частично забитая, требующая очистки.

Источник: материалы автора.

3.1.5 Анализ шумов напряжения методом быстрого преобразования Фурье

Для контроля и записи среднеквадратичного значения напряжения (RMS – Root Mean Square) и низкочастотного шума напряжения на электролизере использовались 14 битные АЦП от компании National Instruments NI USB-6009 (в количестве 2 шт) с частотой дискретизации 48000 Гц, диапазон измерения от 0 до 10 В, см. рисунок 3.9. Использование двух АЦП обусловлено снижением разрядности одного АЦП с 14 до 13 бит при подключении двух каналов. Подключение АЦП к токоподводам осуществлялось с использованием зажимов и экранированных проводов марки МГТФЭ, что обеспечило снижение уровня электромагнитных помех и индуцированных наводок. Для подавления синфазных помех измерительные сигналы подключались к АЦП по дифференциальной схеме.

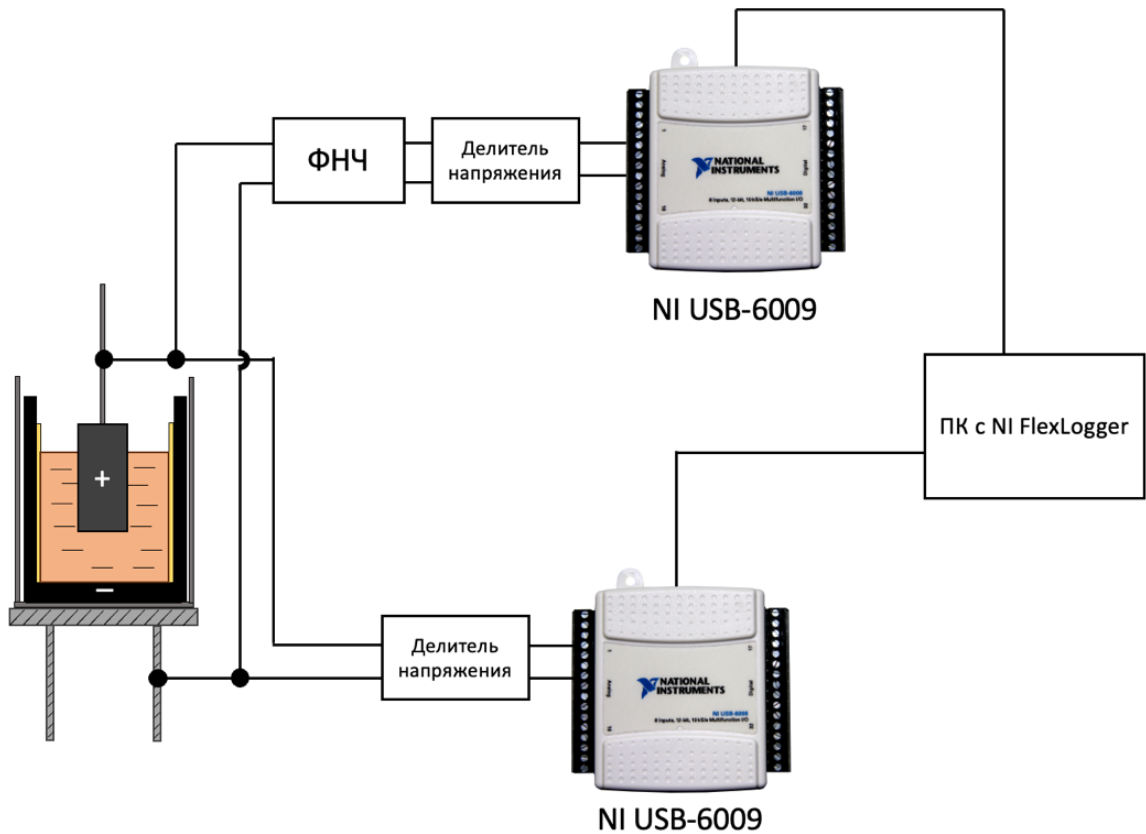


Рисунок 3.9 – Схема проведения измерений шумов напряжения.

Источник: материалы автора.

Для фильтрации низкочастотного шума был собран RC-фильтр низких частот первого порядка для подключения в дифференциальном режиме измерения, см. рис. 3.10. Т.к. пузырьковый шум на электролизере приходится на частоты до 1 Гц, то значения R и C для фильтра определим для частоты среза 1 Гц из формул (3.1), (3.2):

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ЭКВ}} \cdot C} \quad (3.1)$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + R_2$$

где $f_{\text{ср}}$ – частота среза фильтра Гц;

$R_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление двух резисторов, кОм;

C – емкость конденсатора, мкФ.

При $R_1 = R_2 = 10$ кОм

$R_{\text{ЭКВ}} = 20$ кОм, тогда:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{\text{ЭКВ}} \cdot f_{\text{ср}}} = \frac{1}{12,56 \cdot 20000} = 7,96 \text{ мкФ} \quad (3.2)$$

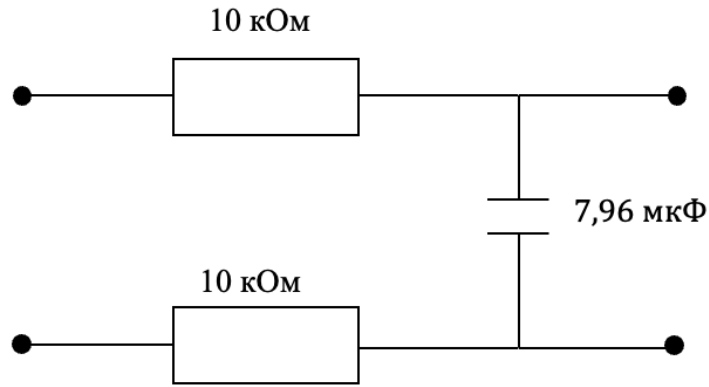


Рисунок 3.10 – Схема RC – фильтра низких частот для подключения сигналов в дифференциальном режиме. Источник: материалы автора

Поскольку напряжение на электролизере может превышать 10 В, для безопасного подключения АЦП были применены два резистивных делителя напряжения с коэффициентом деления 1:2. В программном обеспечении NI FlexLogger для соответствующих каналов был задан коэффициент масштабирования 2, что обеспечило восстановление истинных значений напряжения. Фотография подключенных АЦП к делителям напряжения и фильтру низких частот представлена на рисунке 3.11.

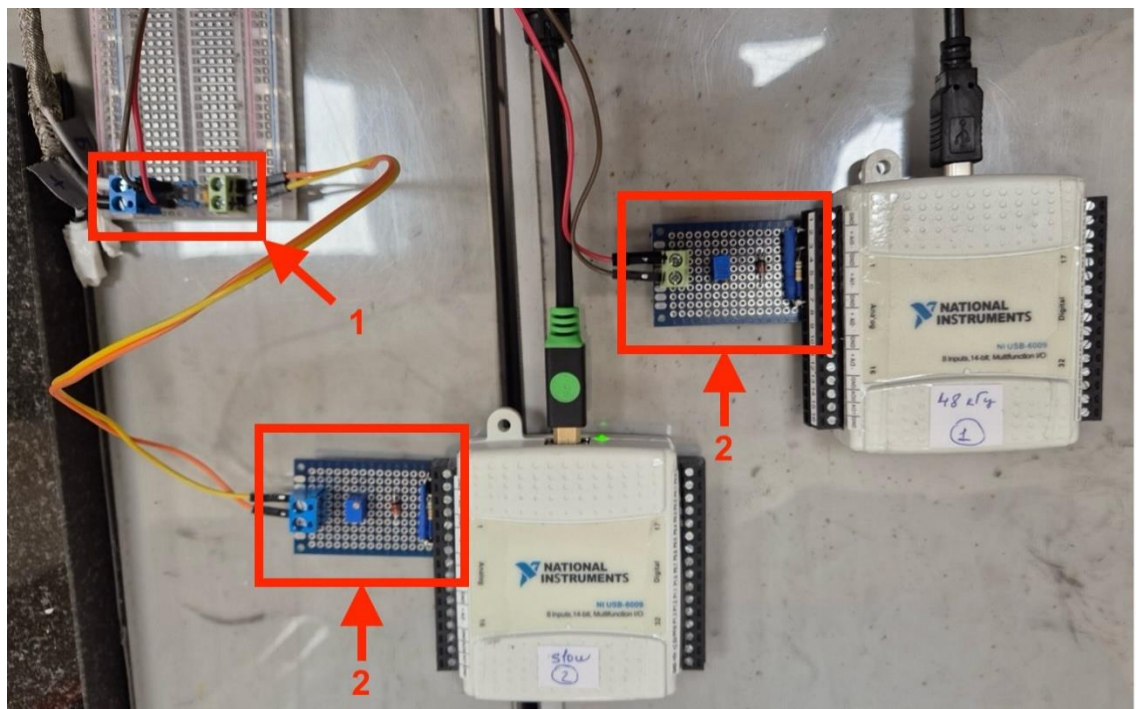


Рисунок 3.11 – Приборы для регистрации напряжения электролитической ячейки. Представлены АЦП NI 6009 с подключенным RC – фильтром низких частот (1) и делителем напряжения (2). Источник: материалы автора

Для NI USB-6009 минимальное входное напряжение, разрешаемое АЦП (точность АЦП) рассчитывается по формуле (3.3):

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^N} = \frac{10 - 0}{2^{14}} = \frac{10}{16384} = 0,00061035156 \text{ В} \quad (3.3)$$

где LSB (Least Significant Bit) – единичный шаг в шкале преобразования, В;

V_{ref} – максимальный уровень входного сигнала, В;

N – разрядность АЦП.

2^N – число интервалов дискретизации измеряемого сигнала.

Для регистрации значений напряжения использовалась программа NI FlexLogger с настроенным экраном оператора для быстрого преобразования Фурье (БПФ) в режиме реального времени.

Для анализа результатов после эксперимента применялась программа NI DIAdem, с возможностью пост обработки данных напряжений с электролизной ячейки методом БПФ.

Быстрое преобразование Фурье (в иностранных источниках Fast Fourier Transform FFT) – это численный алгоритм быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ), которое переводит дискретный сигнал $x(n)$ в частотную область $X(m)$. Цель такого преобразования – анализ спектрального состава сигнала (амплитуды и частоты гармоник).

Количество комплексных умножений, необходимых для выполнения N -точечного ДПФ, определяется по формуле (3.4):

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-2\pi nm/N} \quad (3.4)$$

Ключевым преимуществом БПФ является снижение вычислительной сложности. Общее количество операций в БПФ примерно рассчитывается по формуле (3.5):

$$(N/2) \cdot \log_2 N \quad (3.5)$$

Перед проведением частотного анализа выполнена проверка отсутствия эффекта Алиасинга (Aliasing), который возникает при дискретизации аналогового сигнала при невыполнении условий теоремы Котельникова.

Частота Найквиста – это максимальная частота, которую можно точно представить без алиасинга. Сигналы с частотными компонентами выше частоты Найквиста появляются с наложением между постоянным током и частотой Найквиста. Для АЦП NI USB-6009 частота Найквиста вычисляется по формуле (3.6):

$$F_N = \frac{f_s}{2} = \frac{48000}{2} = 24000 \text{ Гц} \quad (3.6)$$

где F_N – частота Найквиста, Гц;

f_s – частота дискретизации, Гц.

Фотография питателя АПГ представлена на рисунке 3.12.

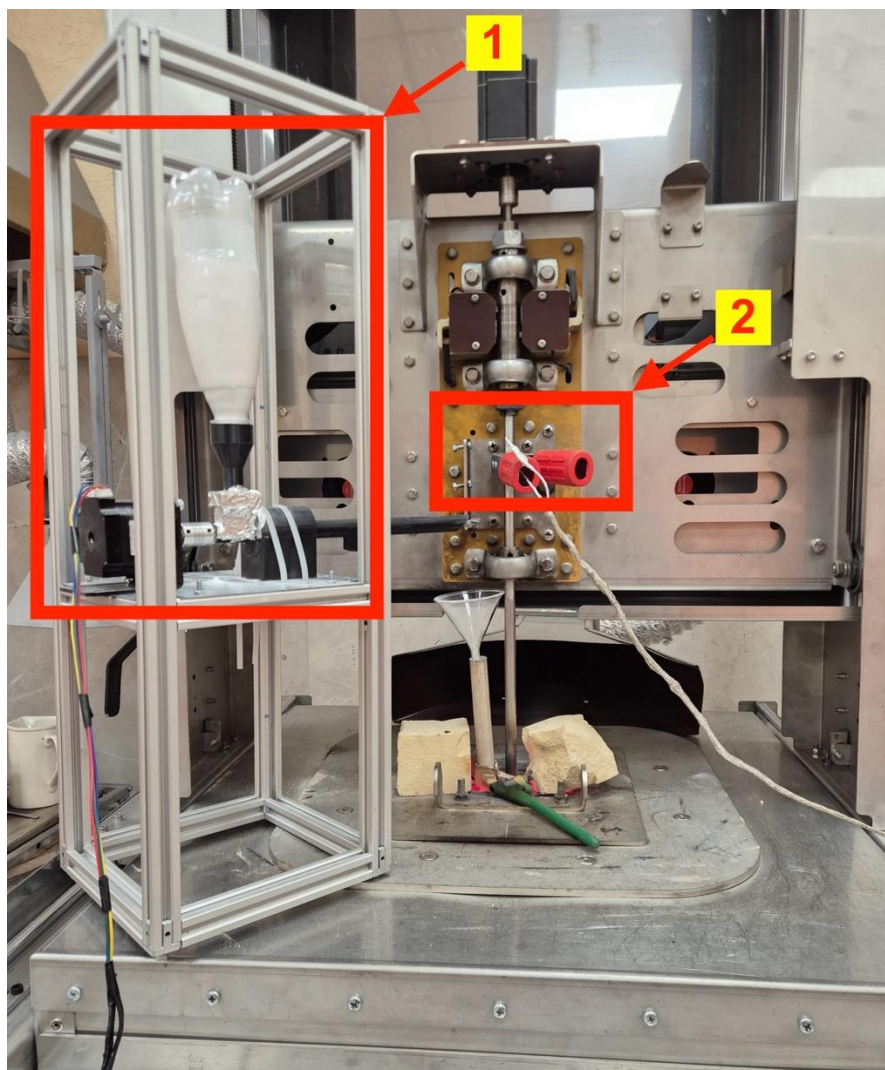


Рисунок 3.12 – Состав лабораторной установки: 1 – система АПГ; 2 – клещи для контроля напряжения на электролизере. Источник: материалы автора

3.1.6 Алюминиевый электрод сравнения

Для изготовления алюминиевого электрода сравнения использовался высокотемпературный корундовый чехол со следующими характеристиками: содержание Al_2O_3 99,7%, открытая пористость менее 0,01 %, максимальная температура использования 1750 °С, длина 300 мм, диаметр внешний 10 мм, диаметр внутренний 6 мм. На высоте 30 мм от дна корундового чехла на станке была изготовлена мембрана диаметром 5 мм (снят верхний слой корунда глубиной 1 мм). Внутри чехла был вставлен молибденовый потенциалосъемник диаметром 2 мм, высотой 600 мм, далее засыпались гранулы алюминия металлического 99,90% (Ч.Д.А., производитель «Реахим»), высота слоя 15 мм от дна чехла. После засыпался дробленый электролит, высота слоя 30 мм. Молибденовый пруток был зафиксирован в корундовом чехле при помощи пробки, изготовленной из асбестового шнура. Верхняя часть электрода сравнения (пробка) была покрыта смесью из жидкого стекла с глиноземом.

Для защиты электрода сравнения от растворения в криолито-глиноземном расплаве (увеличения срока службы) был изготовлен чехол из цилиндрического графитового электрода высотой 80 мм, с внешним диаметром 30 мм. Состав электрода: 82% графита, 18% пека, смесь перемешивалась в керамическом стакане на термостоле с нижним подогревом до достижения температуры смеси 250 °С, после чего засыпалась в предварительно разогретую до 150 °С в сушильном шкафу LOIP LF-120/300-VS1 пресс-форму и прессовалась на лабораторном прессе ПЛГ-20 при давлении 15 МПа, с выдержкой при указанном давлении в течение 2 минут. Далее электрод извлекался из пресс-формы, помещался в керамический стакан, засыпался коксом и загружался в муфельную печь LOIP LF-15/13-V2. Режим обжига электрода:

- 1) загрузка электрода в печь при комнатной температуре;
- 2) нагрев со скоростью 250 °С/ч до 200 °С, выдержка 30 минут;
- 3) нагрев со скоростью 250 °С/ч до 500 °С, выдержка 30 минут;
- 4) нагрев со скоростью 400 °С/ч до 1050 °С, выдержка 120 минут.

Готовый электрод стачивался на токарном станке до внешнего диаметра 20 мм, далее просверливался с торцевой стороны сверлом диаметром 10 мм на глубину 70 мм. На высоте 30 мм от дна графитового чехла в боковой поверхности было изготовлено отверстие диаметром 4 мм для установки тонкой корундовой трубки с внутренним диаметром 1 мм. Данная трубка выполняла функцию мембраны для образования «мостика» из электролита между слоем расплавленного алюминия внутри электрода сравнения и поверхностью измеряемого электрода. Далее графитовый чехол фиксировался на электроде сравнения за счёт плотной посадки, предварительно совмещая отверстие в графитовом чехле и мембрану на электроде сравнения.

Схема конструкции и фотографии алюминиевого электрода сравнения представлены на рисунках 3.13 и 3.14.

Перед использованием алюминиевый электрод сравнения выдерживали в шахтной печи над криолито-глиноземным расплавом в течение 20 минут, обеспечивая его равномерный прогрев и расплавление находящихся в нём слоёв алюминия и электролита.

Измерение напряжения осуществляли при помощи цифрового мультиметра, провода мультиметра закрепляли при помощи зажимов: плюсовой провод фиксировали на токоподводе анода, минусовой провод – на молибденовом потенциалосъёмнике электрода сравнения. Электрод сравнения подводили вплотную стороной с мембраной к аноду, после чего выдерживали до установления стабильных значений и фиксировали показания перенапряжения на аноде.

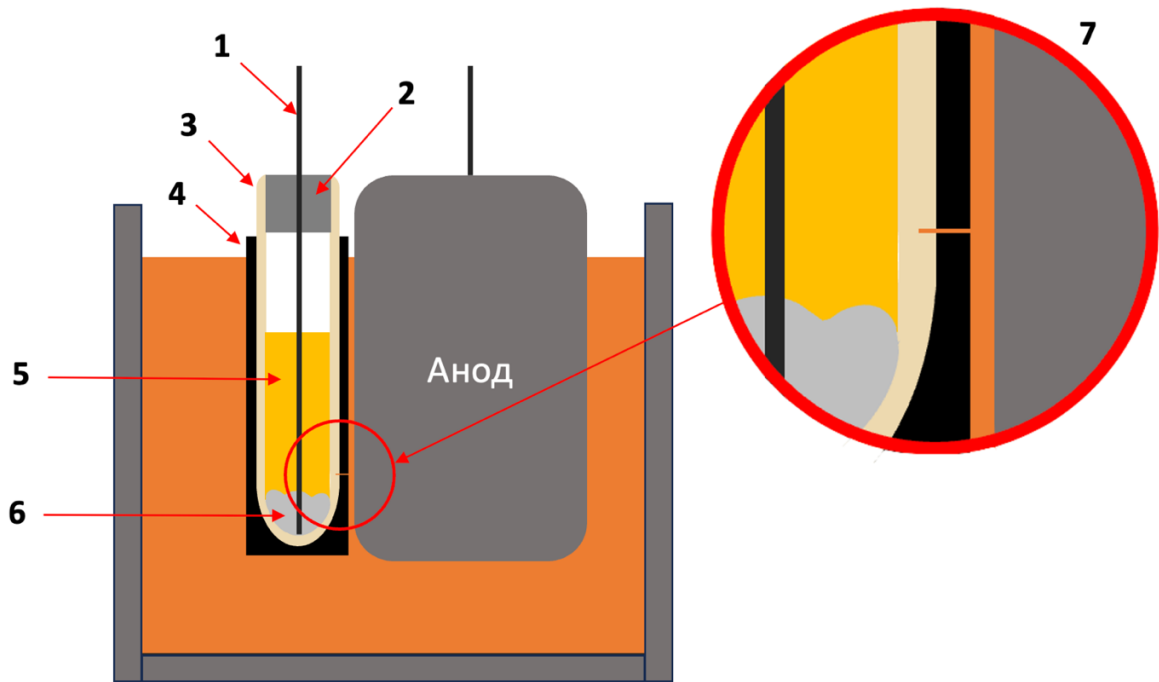


Рисунок 3.13 – Схема конструкции алюминиевого электрода сравнения:

1 – молибденовый потенциалосъемник; 2 – пробка из асбестового шнура; 3 – пористый корундовый чехол с содержанием $\text{Al}_2\text{O}_3 = 99,7\%$; 4 – пористый графитовый чехол; 5 – расплав электролита; 6 – алюминий; 7 – диафрагма в корундовом чехле. Источник: составлено автором



а)



б)



в)

Рисунок 3.14 – Изготовленный алюминиевый электрод сравнения:

а) внешний вид; б) графитовый чехол; в) электрод сравнения во время измерения анодного перенапряжения. Источник: материалы автора.

3.1.7 Определение скорости коррозии электрода

Вычисление объема электрода до и после электролиза выполнялось для расчета его скорости коррозии, т.е. расхода. На рисунках ниже представлена 3d модель электрода при скользящем свете для визуализации и анализа дефектов поверхности, возникших по причине пассивации электрода или неравномерного распределения плотности тока. Сканирование выполнено 3d сканером Creality CR-Scan Ferret, который использует NIR-свет (Near Infrared – источник света в ближнем инфракрасном диапазоне) для подсветки объекта в сочетании с камерами и сенсорами глубины, см. рис. 3.15, 3.16. Сенсоры анализируют отраженный инфракрасный свет, определяя расстояния и создавая 3d-облако точек, т.е. основу для модели. Точность сканирования составляет 0,1 мм, расстояние (разрешение) между точками 0,16 мм, диапазон одиночного сканирования 560 x 820 x 700 мм, расстояние сканирования 150 – 700 мм, скорость сканирования до 30 к/с.



Рисунок 3.15 – Процесс сканирования электрода с использованием 3d сканера Creality CR-Scan Ferret. Источник: материалы автора.



Рисунок 3.16 – Облако точек инфракрасного света, формируемое источником инфракрасного излучения 3D-сканера в процессе оптического сканирования электрода после электролиза для определения его остаточного объёма.

Источник: материалы автора.

При сканировании использовался поворотный стол с нанесенными на него маркерами для обеспечения стабильного отслеживания объекта сканером, предотвращения потери электрода во время сканирования и гарантированного соответствия геометрии отсканированной модели истинным размерам электрода (см. рисунок 3.15). Во время сканирования зеркальной металлической поверхности электродов возникали погрешности, обусловленные диффузным рассеянием инфракрасного излучения сканера, что приводило к снижению точности полученных данных. Для минимизации этих искажений и улучшения качества сканирования применялся матирующий спрей, обеспечивающий тонкое равномерное покрытие. При сканировании угольных электродов дополнительных действий по матированию поверхности не требуется.

Сканирование электродов выполнялось на ноутбуке с видеокартой NVIDIA GeForce RTX 3070 105 W с 8 гигабайтами видеопамяти в программе Creality Scan, в результате для каждого электрода было получено от 150 тыс. до 200 тыс. точек, содержащих информацию о координатах поверхности объекта, см. рисунок 3.17. Далее в Creality Scan производилось удаление поверхности поворотного стола, а также настройка разрешения и чувствительности с целью

фильтрации шумов и артефактов в облаке точек. Пример 3d модели представлен на рисунке 3.18. Построение полигональной сетки осуществлялось в программе CloudCompare, см. рисунок 3.19, после этого вычислялась площадь и объем поверхности электрода в программе Blender. Максимальная относительная погрешность площади 3d модели исходного образца электрода цилиндрической формы составила 4,34 %.

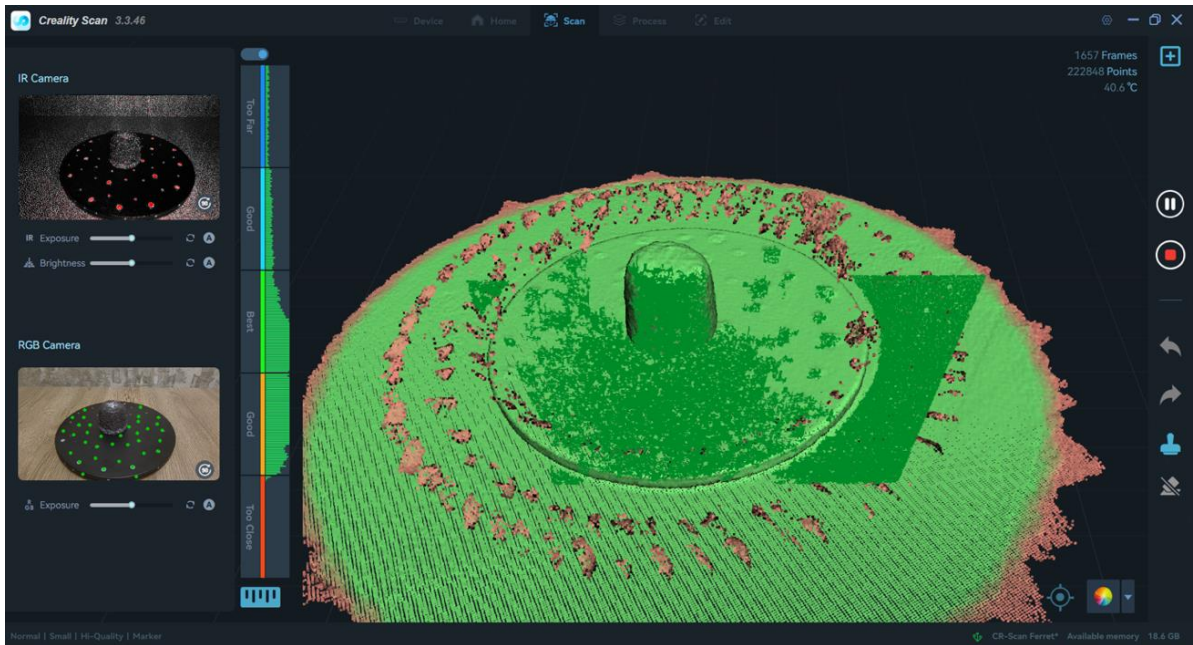


Рисунок 3.17 – Построение модели электрода в программе Crealty Scan. В левой верхней части экрана представлено изображение, получаемое с ИК-камеры. В центральной части отображается построение модели в реальном времени. Источник: материалы автора.

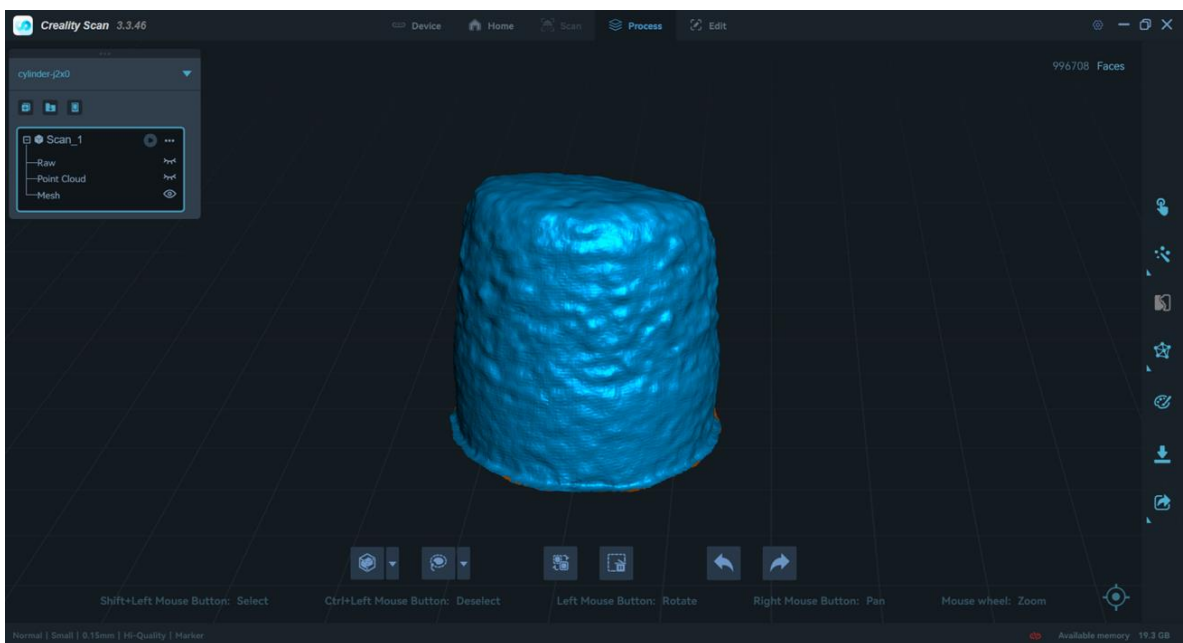


Рисунок 3.18 – 3d модель цилиндрического электрода после электролиза.

Источник: материалы автора.

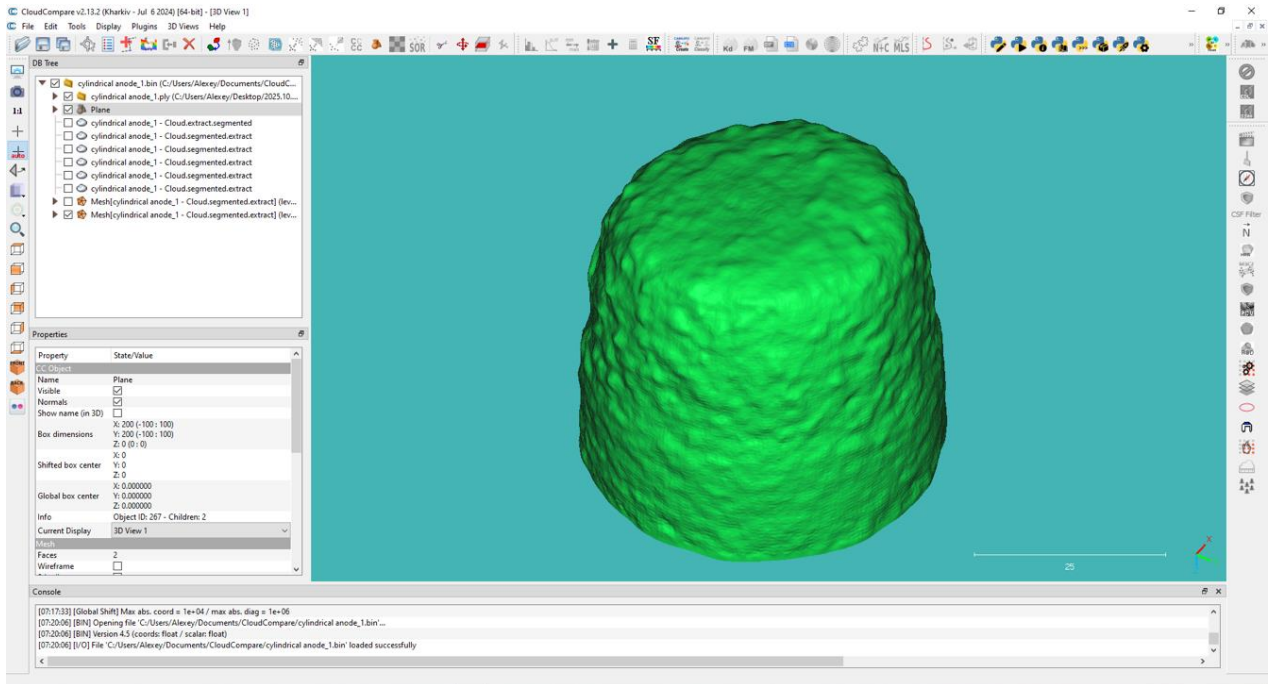


Рисунок 3.19 – Построение полигональной сетки в CloudCompare.

Источник: материалы автора.

3.2 Экспериментальное исследование температурной зависимости удельного сопротивления анода

Определение удельного сопротивления графитизированного анода марки УНР осуществлялось методом Ван дер Пау. Для этого был подготовлен образец электрода диаметром 30 мм и высотой 10 мм. После этого на окружности образца были изготовлены 4 вертикальные насечки глубиной 1 мм, с расположением 0° , 90° , 180° , 270° . Далее образец зажимался в металлическом хомуте, вся площадь которого была заранее изолирована кремнеземной тканью, а в нанесенные насечки вставлялись медные проволоки, изолированные друг от друга керамическими бусами, после чего хомут зажимался. Вся конструкция помещалась в шахтную печь ТУЛА-ТЕРМ СШОЛ-10/11 и продувалась аргоном с объемным расходом 2 л/мин. Контроль температуры электрода осуществлялся при помощи термопары, максимально подведенной к образцу. Измерение сопротивления производилось при помощи микроомметра Мико-21. Вид собранной установки для определения УС образца электрода представлен на рисунке 3.20.



Рисунок 3.20 – Установка для определения УС.

Источник: материалы автора.

Медные проволоки от образца подключались к клещам микроамметра таким образом, чтобы одна дуга электрода являлась частью контура тока, а другая – контуром измерения падения напряжения. После измерения сопротивления дуги смещались на 90° и измерение повторялось, см. схему на рисунке 3.21.

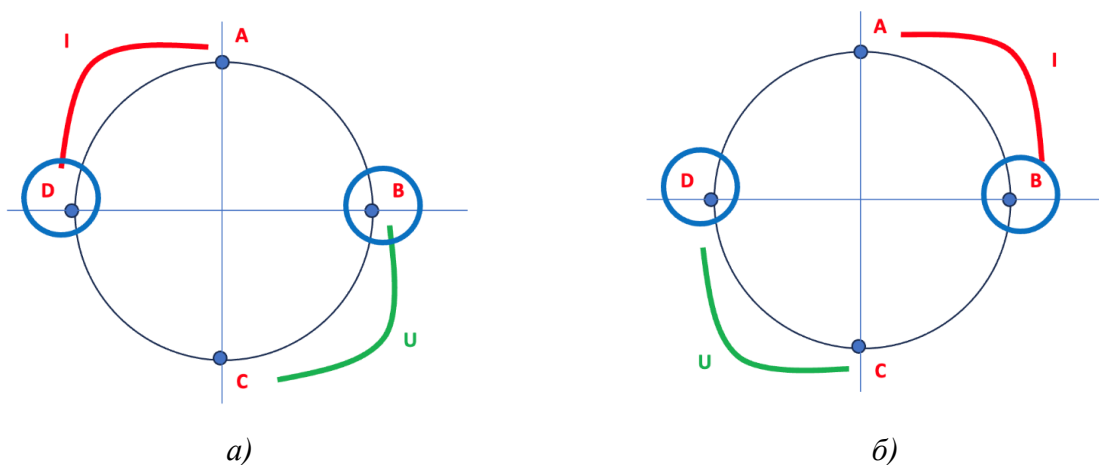


Рисунок 3.21 – Обозначение позиционирования контуров тока и напряжения на образце электрода. $R_{AD,BC}$ – контур тока между A и D, контур измерения падения напряжения между B и C; $R_{AB,CD}$ – контур тока между A и B, контур измерения падения напряжения между C и D. Источник: составлено автором.

Удельное сопротивление рассчитывалось по формуле Ван дер Пау (3.7):

$$\rho = \frac{\pi \cdot h}{\ln 2} \cdot \frac{R_{AD,BC} + R_{AB,CD}}{2}, \text{ мкОм} \cdot \text{м} \quad (3.7)$$

где h – высота образца, м;

ρ – удельное сопротивление, Ом · м;

$R_{AD,BC}$ – сопротивление в контуре тока между точками А и D, с измеренным падением напряжения в контуре между В и С, Ом;

$R_{AB,CD}$ – сопротивление в контуре тока между точками А и В, с измеренным падением напряжения в контуре между С и D, Ом.

Полученный график удельного сопротивления представлен на рис. 3.22.

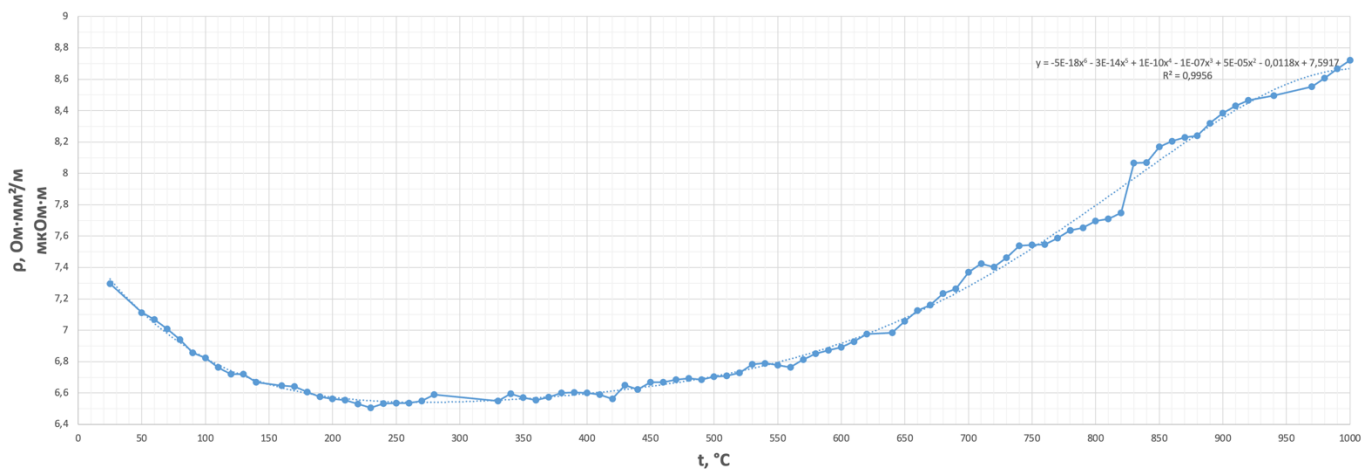


Рисунок 3.22 – График удельного сопротивления графитизированного анода марки УНР в диапазоне температур от 25 °C до 1000 °C.

Источник: материалы автора.

Численные значения удельного сопротивления графитизированного анода марки УНР в диапазоне температур от 25 °C до 1000 °C представлены в Приложении Г.

3.3 Экспериментальные исследования влияния концентрации глинозема на низкочастотную составляющую шумов напряжения в электролизере методом БПФ

3.3.1 Эксперимент по электролизу криолито-глиноземного расплава

Параметры эксперимента №1:

- КО электролита = 2,4;
- температура в шахтной печи $T_{\text{печи}} = 995$ °C;
- начальная концентрация Al_2O_3 в электролите = 0 %;
- плотность электролита $\rho_{\text{эл}} = 2,165$ г/см³;
- диаметр цилиндрического анода $d = 5,0$ см;
- высота цилиндрического анода $h = 5,0$ см;

- целевая высота электролита после погружения анода = 7,0 см;
- глубина погружения анода = 4,5 см;
- МПР = 2,5 см;
- объем погруженного анода = 88,357 см³
- $d_{\text{внутренний}}$ графитового тигля = 10 см;
- $d_{\text{внешний}}$ корундового кольца = 9,5 см;
- $d_{\text{внутренний}}$ корундового кольца = 8,5 см.

Распределение объема электролита после погружения цилиндрического анода представлено на рис. 3.23. В графитовый тигель вставлено изоляционное корундовое кольцо, при этом электролит проникает под основанием кольца и распределяется в зазоре между тиглем и кольцом. Уровень электролита в данном зазоре всегда соответствует уровню электролита внутри корундового тигля.

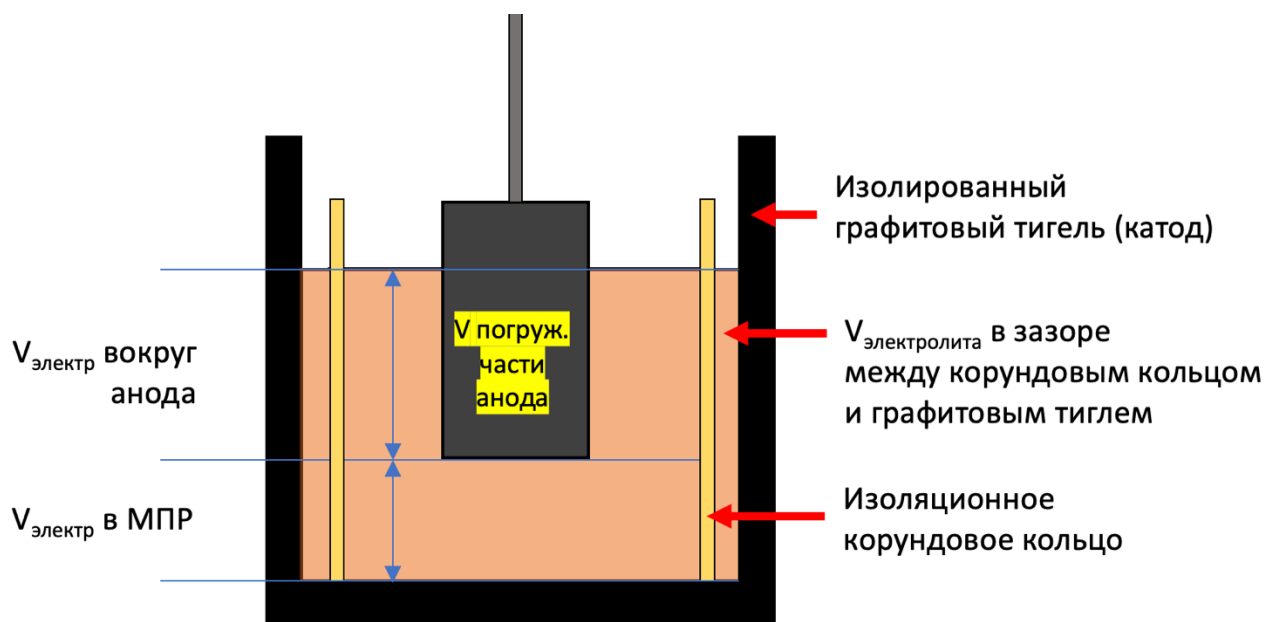


Рисунок 3.23 – Распределение объема электролита после погружения анода

Источник: материалы автора.

На основании представленных данных требуется рассчитать объем и массу электролита, необходимую для засыпки в корундовый тигель перед началом эксперимента, а также определить уровень электролита до погружения анода. Результаты расчета:

- S сечения внутренней части корундового кольца = 56,745 см²;
- S сечения зазора между тиглем и кольцом = 7,658 см²;
- S общая сечений внутренней части корундового кольца и зазора между тиглем и кольцом = 64,403 см²;
- V стенок корундового кольца = 98,96 см³;

- V электролита в зазоре между тиглем и кольцом при уровне расплава 7 см = 53,603 см³;
- V электролита вокруг анода внутри корундового кольца = 166,995 см³;
- V электролита в МПР внутри корундового кольца = 141,863 см³;
- V полный электролита = 362,461 см³;
- требуемая масса электролита $m_{\text{электролита}} = 784,548$ г.

Высоту электролита до погружения анода рассчитаем по формуле (3.8):

$$h_0 = h_1 - \frac{V_{\text{погруженной части анода}}}{S_{\text{общ.сечений внутр части корунд.кольца и зазора}}} = 7 - \frac{88,357}{64,403} = 5,63 \text{ см} \quad (3.8)$$

Рассчитаем требуемое значение силы тока в эксперименте для уставки в SCADA с учетом катодной плотности тока 0,8 А/см²:

- площадь катода = 56,745 см²;
- катодная плотность тока 0,8 А/см²;
- $I = 45,39$ А;
- площадь дна анода = 19,63 см²;
- площадь боковой поверхности анода = 70,69 см²;
- анодная плотность тока по дну (при распределении 80 % тока) = 1,85 А/см²;
- анодная плотность тока по боковой поверхности (при распределении 20 % тока) = 0,128 А/см².

Масса электролита до эксперимента $m_{\text{эл_нач}} = 784,55$ г

Масса электролита после эксперимента $m_{\text{эл_кочеч}} = 641,55$ г

Расход электролита составил $m = 143,0$ г

- для расчета концентрации глинозема в электролите на момент завершения эксперимента

Изоляционное корундовое кольцо с содержанием Al₂O₃ 99,7%, с открытой пористостью менее 0,01 %:

- внешний диаметр $d_{\text{внешн}} = 9,5$ см
- внутренний диаметр до эксперимента №1 $d_{\text{внутр_до_1}} = 8,5$ см;
- внутренний диаметр после эксперимента №1 (ниже уровня электролита) $d_{\text{внутр_после_1}} = 8,74$ см;
- начальная масса (до эксперимента) $m_{\text{нач}} = 491,35$ г;
- конечная масса (после эксперимента №1) $m_{\text{кон}} = 384,10$ г;
- израсходованная масса (после эксперимента №1) $m_{\text{кон}} = 107,25$ г.

Фотография процесса электролиза представлена на рисунке 3.24.



Рисунок 3.24 – Фото погруженного анода в расплав КГР.

Источник: материалы автора

Показания с электрода сравнения (замеряли после 10 минут погружения в криолито-глиноземный расплав):

При концентрации $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0 \%$:

- U электролиза = 5,3 В;
- U_a относительно анода = 2,7 В.

При концентрации $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,5 \%$:

- U электролиза = 4,63 В;
- U_a относительно анода = 2,01 В.

Время эксперимента №1 $t_{\text{эксп}}$ составило 7,6 ч.

Масса наработанного алюминия $m_{\text{ал}} = 95,35$ г.

Рассчитаем выход по току по формуле (3.9):

$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{m_{\text{практ}}}{0,3356 \cdot I \cdot t_{\text{часы}}} \cdot 100\% = \frac{95,35}{0,3356 \cdot 45,39 \cdot 7,6} \cdot 100\% = 82,36\% \quad (3.9)$$

Выход по току составил 82,36 %.

Параметры эксперимента и график напряжения в SCADA системе представлены на рисунке 3.25.

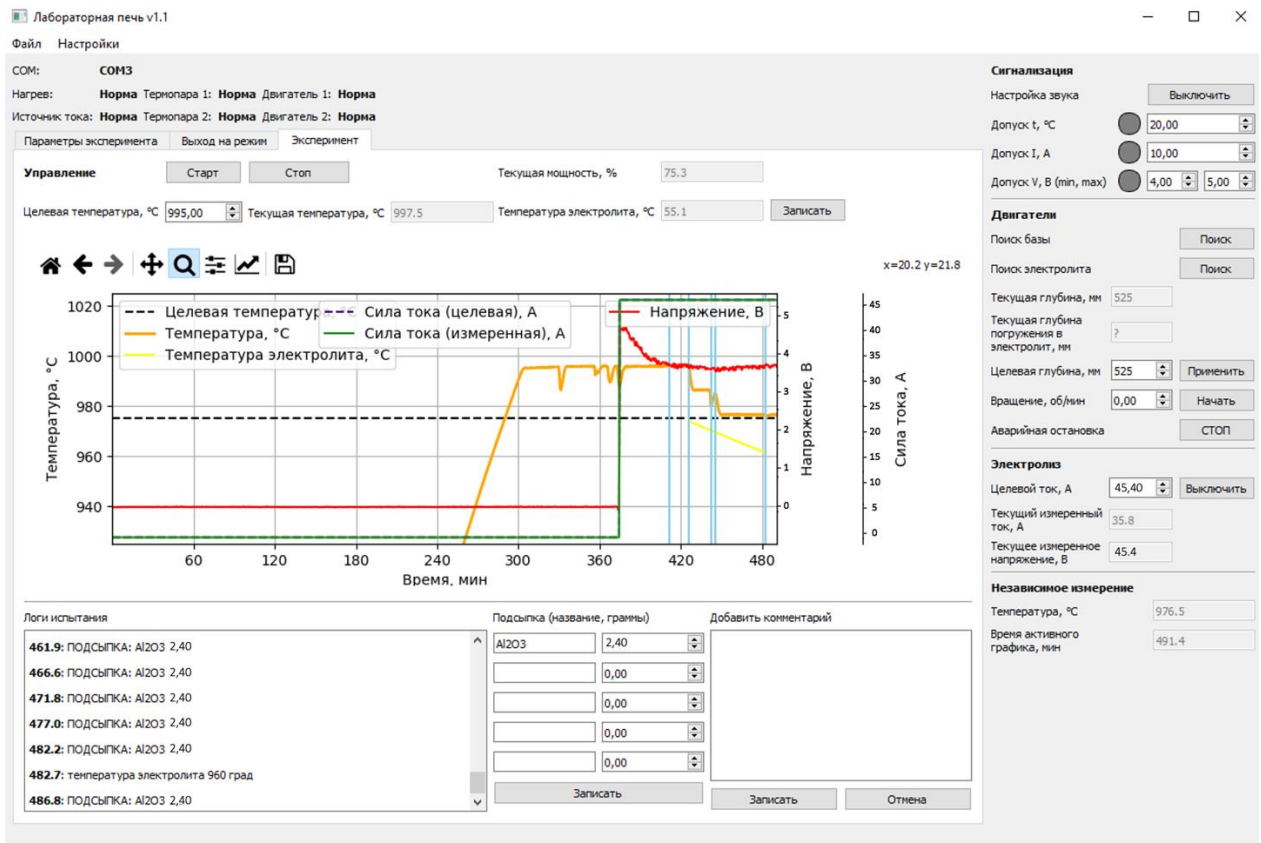


Рисунок 3.25 – Параметры эксперимента и график напряжения в SCADA системе электролизной установки. Источник: материалы автора.

После электролиза электрод был отсканирован 3d сканером в программе Creality Scan, далее построена полигональная сетка в CloudCompare, после этого определены площадь и объем поверхности электрода в программе Blender (см. рисунки 3.26 – 3.27).

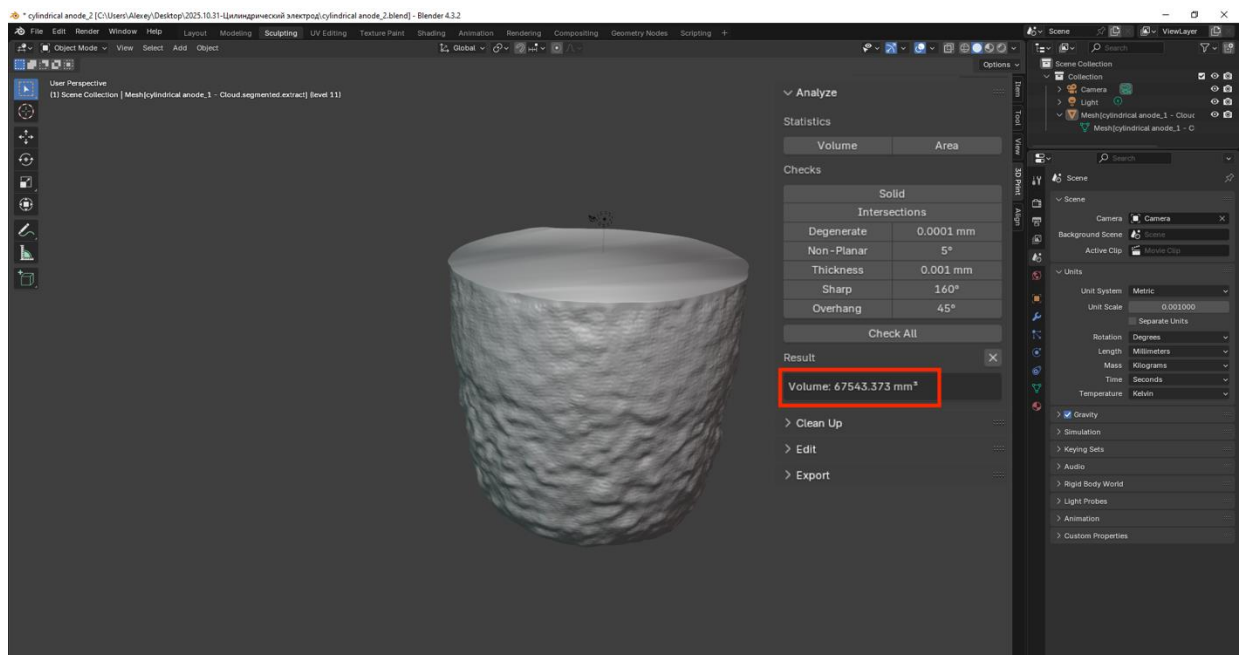


Рисунок 3.26 – Вычисление объема поверхности электрода в Blender.

Источник: материалы автора.

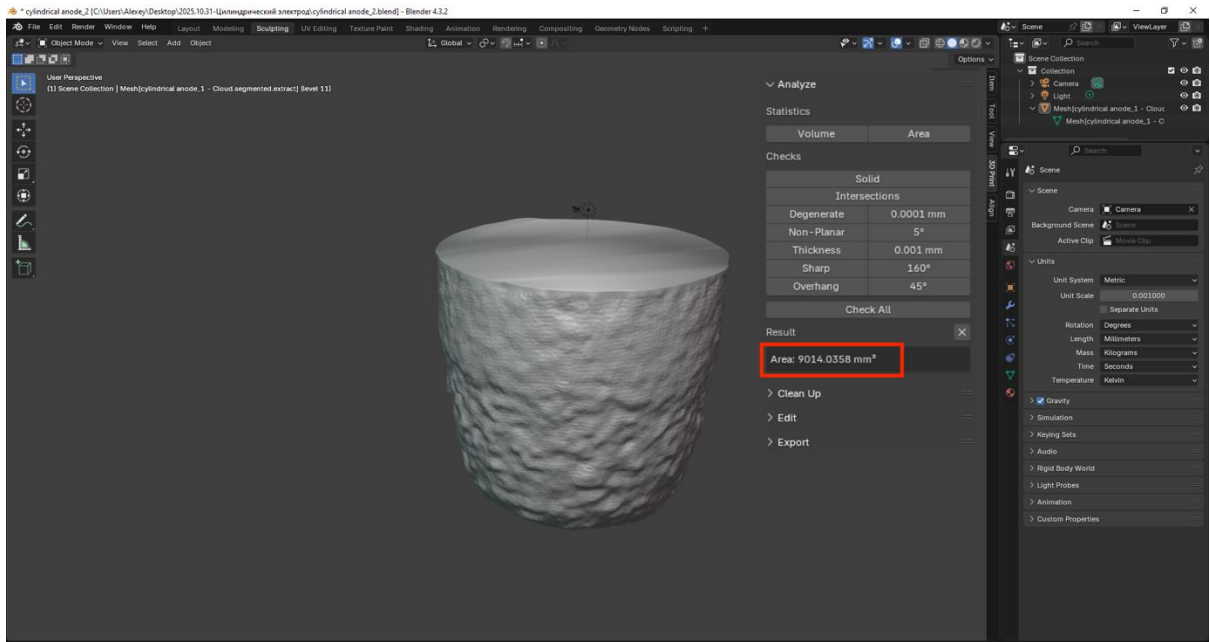


Рисунок 3.27 – Вычисление площади поверхности электрода в Blender.

Источник: материалы автора.

Масса электрода до и после электролиза, плотность электрода:

$$m_0 = 170,45 \text{ г};$$

$$m_1 = 117,27 \text{ г};$$

$$\Delta m = 53,18 \text{ г};$$

$$\rho = 1,736235743 \text{ г/см}^3.$$

Начальные значения объема и площади электрода:

$$V_0 = 98174,77 \text{ мм}^3;$$

$$S_0 = 11780,972 \text{ мм}^2.$$

Значения объема и площади после электролиза:

$$V_1 = 67543,373 \text{ мм}^3;$$

$$S_1 = 9014,0358 \text{ мм}^2.$$

Продолжительность эксперимента: $t_{\text{эксп}} = 7,6$ часов;

Глубина погружения анода $h = 4,5$ см;

Площадь погруженной части анода = $9032,078879 \text{ мм}^2$;

Для расчета удельной скорости коррозии анода по площади используем формулу (3.10) и (3.11):

$$v_A = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{\rho \cdot (V_0 - V_1)}{A \cdot t}, \quad \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}} \quad (3.10)$$

где V_0 – объем погруженной части электрода до;

V_1 – объем погруженной части электрода после;

ρ – плотность электрода, г/см³;

Δm – изменение массы электрода в процессе электролиза, г;

A – площадь погруженной части электрода, см²;

t – время эксперимента, ч.

$$v_A = \frac{53,18}{90,32 \cdot 7,6} = 0,07747 \text{ , } \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}} \quad (3.11)$$

Параметры эксперимента №2:

Масса электролита до эксперимента $m_{\text{эл_нач}} = 785$ г

Изоляционное корундовое кольцо с содержанием Al_2O_3 99,7%, открытая пористость менее 0,01 %

начальная масса (до эксперимента) $m_{\text{нач}} = 384,10$ г;

конечная масса (после эксперимента №1) $m_{\text{кон}} = 321,35$ г;

израсходованная масса (после эксперимента №1) $m_{\text{кон}} = 62,75$ г.

Катодная плотность тока 0,8 А/см²

Анодная плотность тока 1,8 А/см²

Время эксперимента №2 $t_{\text{эксп}}$ составило 7,475 ч.

Масса наработанного алюминия $m_{\text{ал}} = 92$ г.

Рассчитаем выход по току по формуле (3.12):

$$\eta = \frac{m_{\text{практ}}}{m_{\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{m_{\text{практ}}}{0,3356 \cdot I \cdot t_{\text{часы}}} \cdot 100\% = \frac{92}{0,3356 \cdot 45,39 \cdot 7,475} \cdot 100\% \quad (3.12)$$

$$= 80,79\%$$

Выход по току составил 80,79 %.

Показания с электрода сравнения замеряли после 10 минут погружения в криолито-глиноземный расплав.

При концентрации $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0$ %:

- U электролиза = 4,7 В;
- $U_{\text{а}}$ относительно анода = 2,5 В.

При концентрации $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2,5$ %:

- U электролиза = 4,1 В;
- $U_{\text{а}}$ относительно анода = 1,99 В.

Вычисленная площадь и объем поверхности электрода в программе Blender (см. рисунки 3.28 – 3.29).

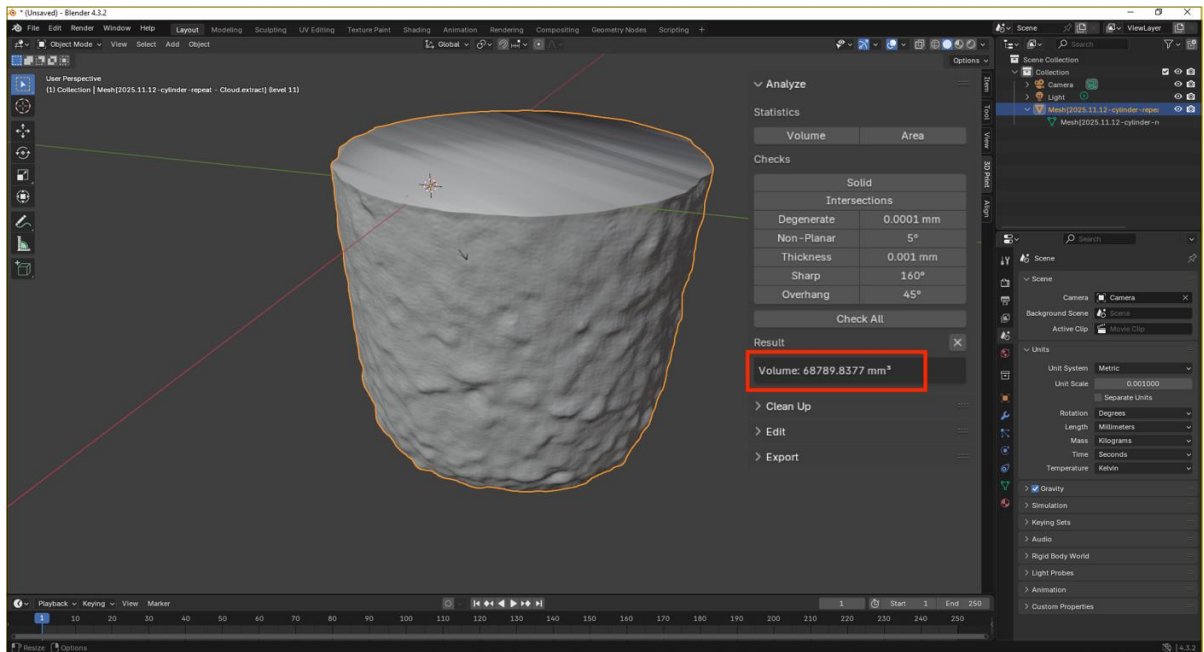


Рисунок 3.28 – Вычисление объема поверхности электрода в Blender.

Источник: материалы автора.

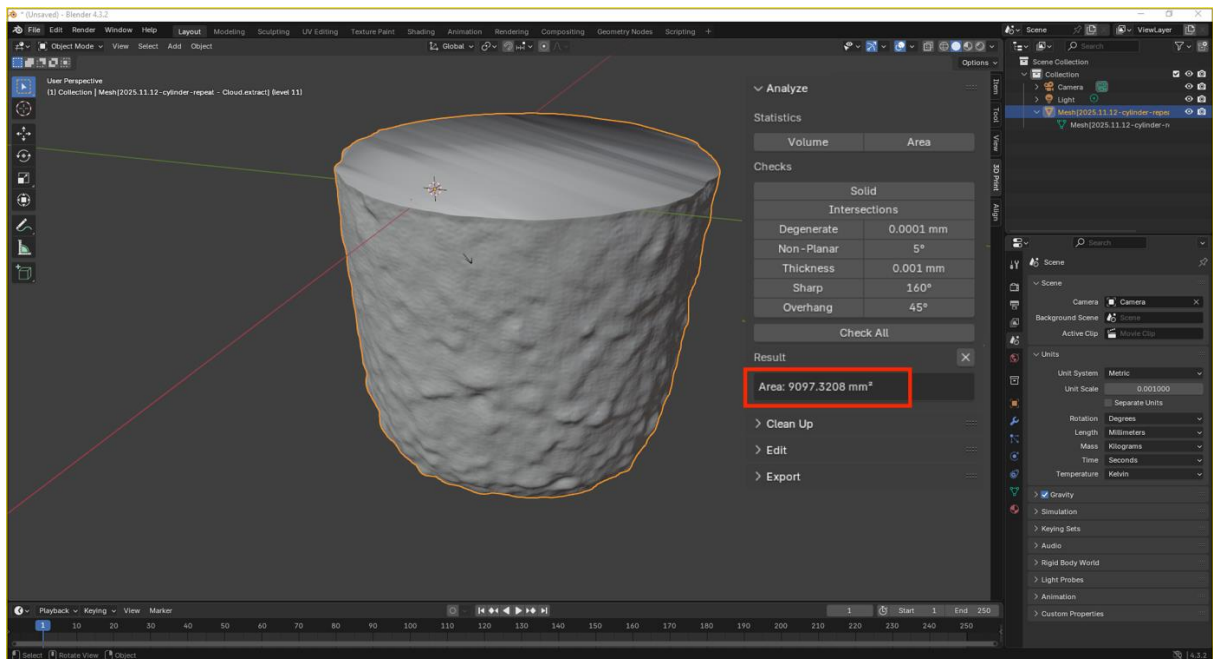


Рисунок 3.29 – Вычисление площади поверхности электрода в Blender.

Источник: материалы автора.

Масса электрода до и после электролиза, плотность электрода:

$$m_0 = 170,45 \text{ г;}$$

$$m_1 = 119,44 \text{ г;}$$

$$\Delta m = 51,01 \text{ г;}$$

$$\rho = 1,736235743 \text{ г/см}^3.$$

Начальные значения объема и площади электрода:

$$V_0 = 98174,77 \text{ мм}^3;$$

$$S_0 = 11780,972 \text{ мм}^2.$$

Значения объема и площади после электролиза:

$$V_1 = 68789,8377 \text{ мм}^3;$$

$$S_1 = 9097,3208 \text{ мм}^2.$$

Продолжительность эксперимента: $t_{\text{эксп}} = 7,475$ часов;

Глубина погружения анода $h = 4,5$ см;

Площадь погруженной части анода = $9032,078879 \text{ мм}^2$;

Рассчитаем скорость коррозии по формуле (3.13):

$$v_A = \frac{\Delta m}{A \cdot t} = \frac{\rho \cdot (V_0 - V_1)}{A \cdot t} = \frac{51,01}{90,32 \cdot 7,475} = 0,07555, \quad \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}} \quad (3.13)$$

3.3.2 Обработка и анализ результатов эксперимента

Во время эксперимента к токоподводам электролизной ячейки подключались 2 АЦП NI 6009 один из которых регистрировал данные с частотой 48 кГц, второй был подключен после RC-фильтра низких частот. Регистрация напряжения осуществлялась в программе NI FlexLogger в которой были настроены графики частотного анализа БПФ. По итогам эксперимента были определены преобладающие низкие частоты и их амплитуды, характерные для следующих значений содержания глинозема в расплаве, см. рисунки 3.30 – 3.36:

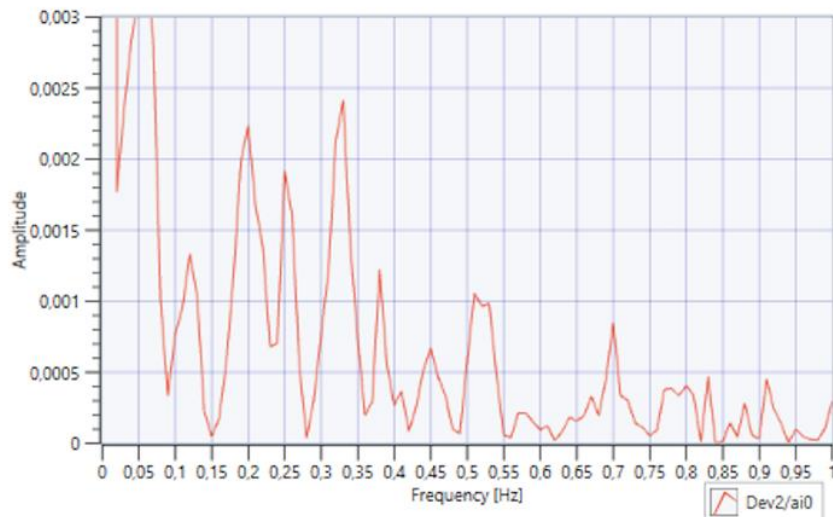


Рисунок 3.30 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера. $S_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,5$ % основной пик находится вблизи 0,05 Гц, амплитуда составляет 0,003 В. Источник: материалы автора.

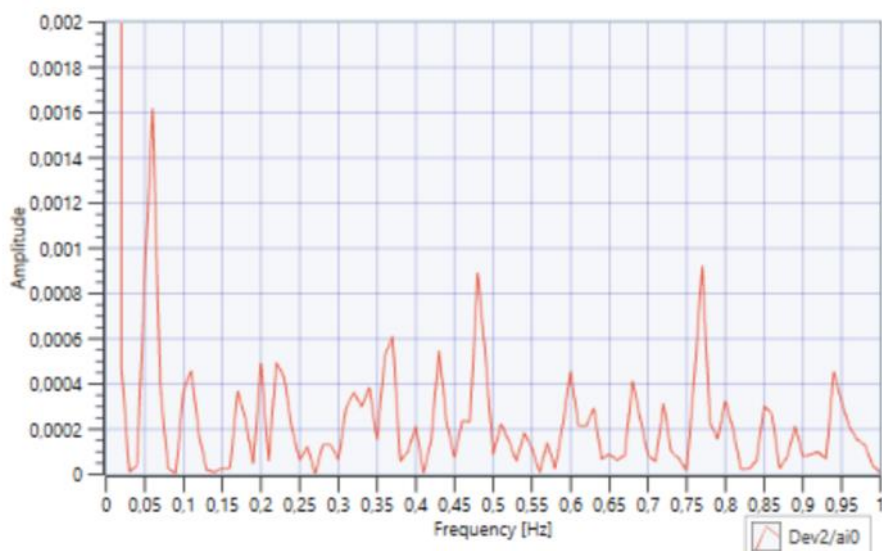


Рисунок 3.31 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера.

$C_{Al_2O_3} = 1,0 \%$ основной пик находится вблизи 0,05 – 0,1 Гц, амплитуда составляет 0,0016 В.

Источник: материалы автора.

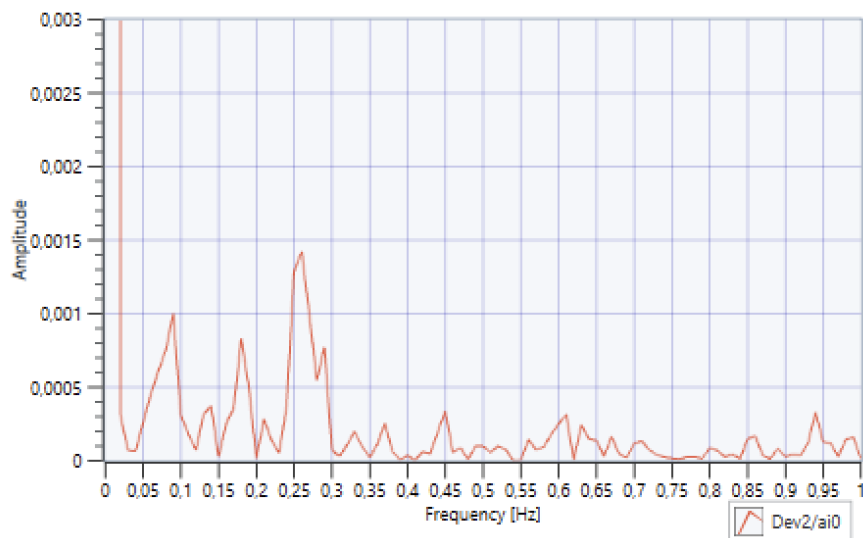


Рисунок 3.32 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера.

$C_{Al_2O_3} = 1,5 \%$ основной пик находится вблизи 0,25 – 0,3 Гц, амплитуда составляет 0,0015 В.

Источник: материалы автора.

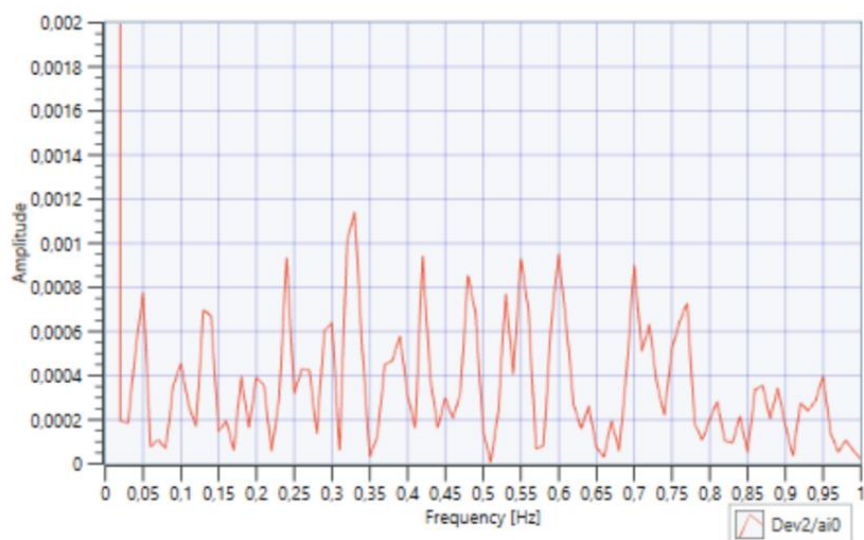


Рисунок 3.33 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера. $C_{Al_2O_3} = 2,0\%$ частоты равномерно распределены в диапазоне 0,2 – 0,6 Гц, амплитуда составляет 0,009 – 0,011 В. Источник: материалы автора.

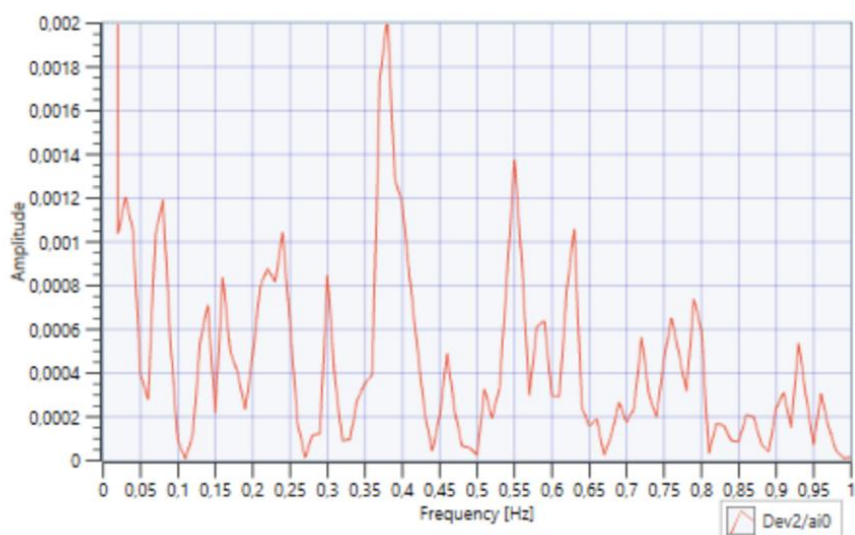


Рисунок 3.34 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера. $C_{Al_2O_3} = 2,5\%$ основной пик находится на частоте 0,35 – 0,4 Гц, амплитуда составляет 0,002 В. Источник: материалы автора.

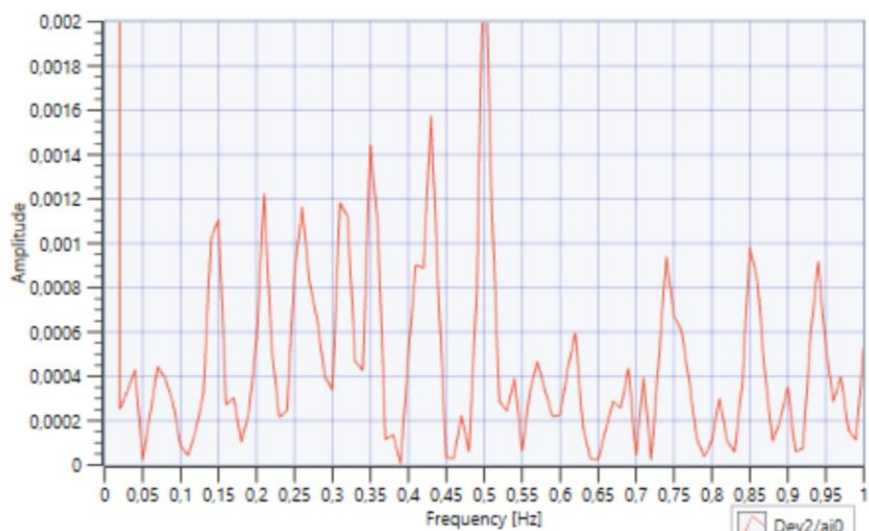


Рисунок 3.35 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера.

$C_{Al_2O_3} = 3,0\%$ основной пик находится на частоте 0,5 Гц, амплитуда составляет 0,002 В.

Источник: материалы автора.

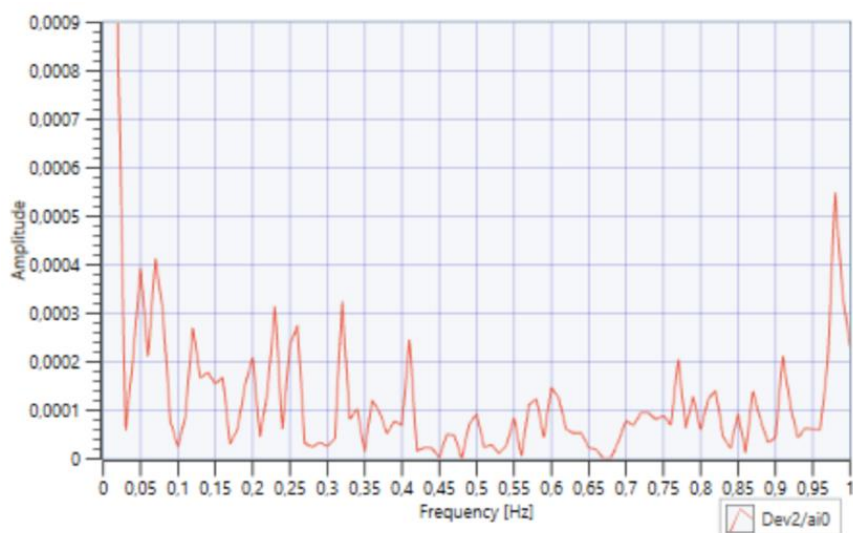


Рисунок 3.36 – График частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера.

$C_{Al_2O_3} = 3,5\%$ основной пик находится в диапазоне 0,95 – 1 Гц, амплитуда составляет 0,00055 В.

Источник: материалы автора.

Результаты объясняются изменением краевого угла смачивания анода электролитом в зависимости от концентрации глинозема в КГР. С уменьшением концентрации глинозема угол смачивания увеличивается. С увеличением краевого угла смачивания электролит хуже смачивает анод, происходит коалесценция пузырьков, т.е. слияние и увеличение их в размере, при этом их отрыв от поверхности электрода происходит реже, вследствие чего преобладающие частоты ниже и имеют большую амплитуду. При большом газовом слое резко увеличивается сопротивление в МПР. При высоких значениях содержания глинозема пузырьки имеют меньший

размер, отрываются от поверхности чаще, поэтому преобладающие частоты выше, а их амплитуда ниже.

Графики напряжения и тока с экспериментов представлены на рисунках 3.37 и 3.38.

В первом эксперименте изменение графика напряжения обуславливались следующими событиями (см. рисунок 3.37):

- 1 – первоначальный рост напряжения и плавное снижение в первые 30 минут эксперимента из-за десорбции кислорода с поверхности анода;
- 2 – подмыкание угольной пены;
- 3 – корректировка МПР (увеличение на 15 мм), а затем уменьшение МПР на 10 мм для корректировки напряжения на электролизной ячейке;
- 4, 5 – корректировка МПР (увеличение на 5 мм) из-за наработки слоя алюминия.

Во втором эксперименте изменение графика напряжения обуславливались следующими событиями (см. рисунок 3.38):

- 1 – первоначальный рост напряжения и плавное снижение в первые 30 минут эксперимента из-за десорбции кислорода с поверхности анода;
- 2 – колебание напряжения, вызванное изменением режима питания: увеличение дозы Al_2O_3 и увеличение интервалов между питаниями;
- 3, 4, 5 – корректировка МПР (увеличение на 5 мм) из-за наработки слоя алюминия.

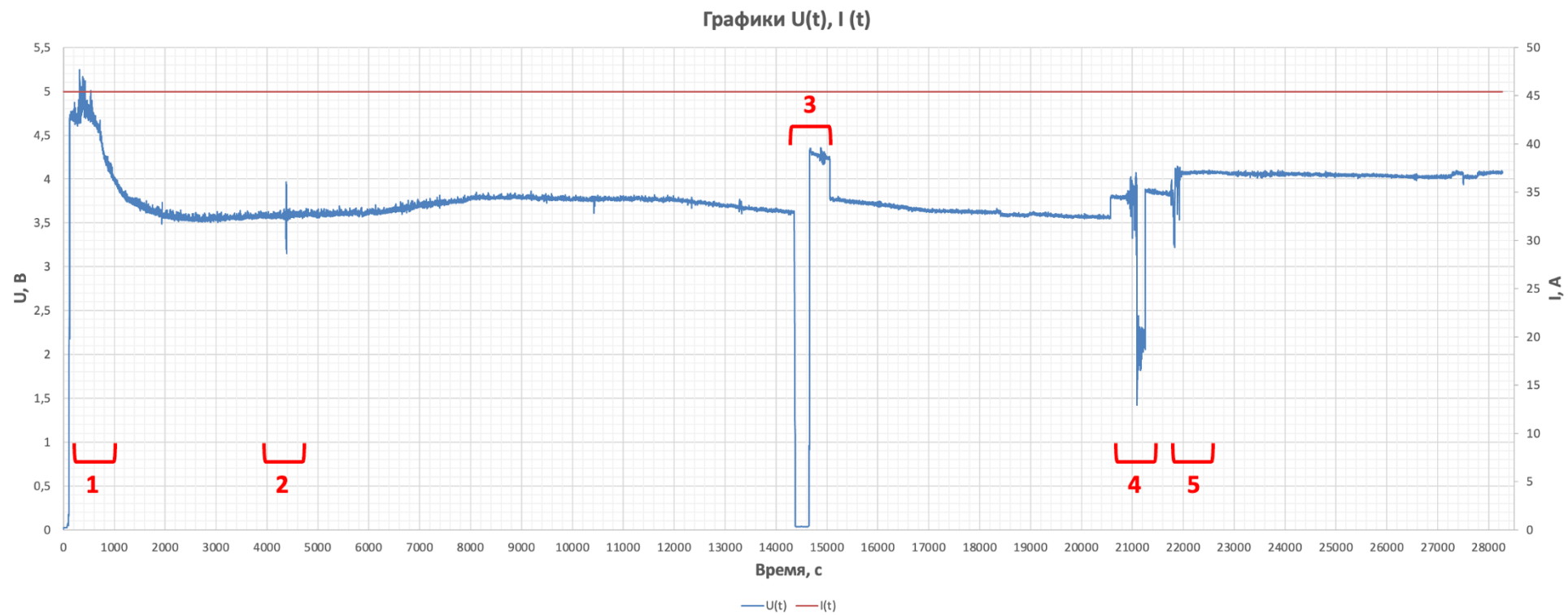


Рисунок 3.37 – Графики напряжения и тока во время эксперимента №1. Источник: материалы автора

Графики $U(t)$, $I(t)$



Рисунок 3.38 – Графики напряжения и тока во время эксперимента №2. Источник: материалы автора

Фото электрода после завершения процесса электролиза представлено на рисунке 3.39.

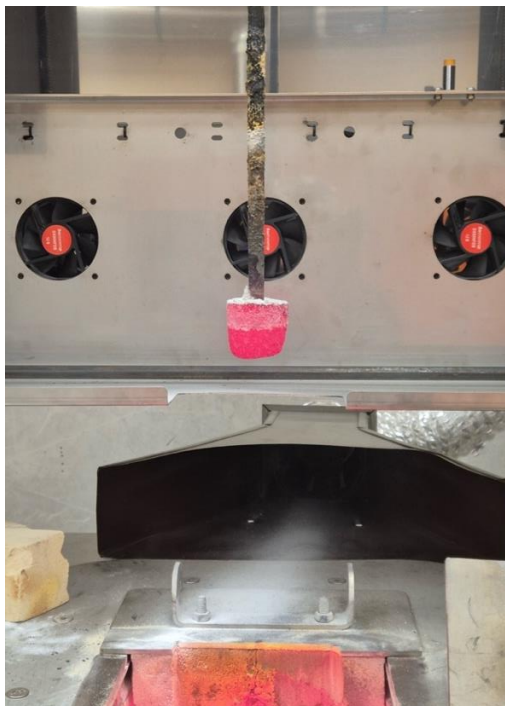


Рисунок 3.39 – Фотография анода в конце эксперимента.

Источник: материалы автора.

На электроде после эксперимента можно заметить красные включения из оксида железа см. рисунок 3.40, который добавляется для снижения вероятности растрескивания электрода.



Рисунок 3.40 – Графитизированный анод из нефтяного кокса. Источник: материалы автора.

Наработанный алюминий по окончании процесса электролиза представлен на рисунках 3.41 и 3.42.

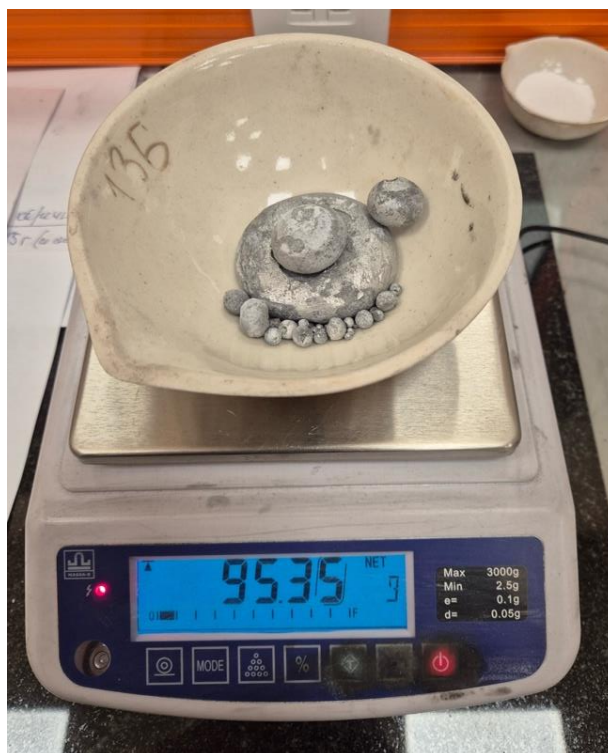


Рисунок 3.41 – Нарботанный алюминий. Источник: материалы автора



а)



б)

Рисунок 3.42 – Результаты эксперимента: а) алюминий в застывшем электролите;
б) наработанный алюминий, очищенный от электролита

Источник: материалы автора

В ходе экспериментов было опробовано непрерывное питание с использованием корундовых стержней с содержанием Al_2O_3 99,7%, с открытой пористостью менее 0,01 %, см. рис. 3.43.

Начальные размеры и масса стержня:

- $h = 100,2$ мм;
- $d = 19,8$ мм;
- $m = 122,35$ г.

После двух часов электролиза:

- $h = 99,7$ мм;
- $d = 18,2$ мм;
- $m = 101,85$ г.
- Расход составил = $10,25$ г/ч.



а)



б)

Рисунок 3.43 – Корундовые стержни: а) вид сбоку; б) вид сверху.

Левый стержень – до эксперимента, правый стержень – после двух часов электролиза.

Источник: материалы автора

Расчет времени растворения дозы глинозема (интервала питания) осуществлялся по формуле (3.14):

$$\tau = \frac{m_{\text{доб}}}{M_{\text{распл}} \cdot \nu_p} = \frac{5}{1,7 \cdot 0,01} = 294,1 \text{ с} \quad (3.14)$$

Для расчета параметров лабораторного эксперимента была написана программа на языке программирования Python 3.11, интерфейс программы и результаты вычислений см. на рис. 3.44, 3.45, 3.46.

Расчет эксперимента

Расчет добавки и скорости растворения | Расчет коэф. для питателя | Динамика изм. концентрации Al_2O_3

Масса электролита, г:

Начальный Al_2O_3 : грамм %

% Al_2O_3 :

КО: отношение массы

Отношение NaF/AlF₃:

Требуемый % Al_2O_3 через 1 ч:

Интервал питания, с:

Ток, А:

Выход по току, %:

Целевое значение концентрации Al_2O_3 через 1 час, %: 2.5000
 Необходимо загрузить за час Al_2O_3 , г : 25.5000
 Число питаний в час, шт : 12.0000
 Масса дозы Al_2O_3 для разовой загрузки, г: 2.1250
 Значение тока, А : 37.4000
 Выход по току, % : 40.0000
 Теоретическая масса наработки Al за 1 ч, г: 12.5504
 Теоретический расход Al_2O_3 за 1 ч, г/ч : 23.7135
 Практический расход Al_2O_3 за 1 ч, г/ч : 9.4854

Растворение глинозема

Тип глинозема: неактивированный механоактивированный

Конц. Al_2O_3 , %:

Масса добавки, г:

Масса электролита, кг:

Скорость растворения: 0.01080 г/(кг·с)
 Время растворения: 272.33 с

Рисунок 3.44 – Интерфейс программы для расчета параметров лабораторного эксперимента.

Расчет массы добавки Al_2O_3 , скорости и времени растворения.

Источник: материалы автора

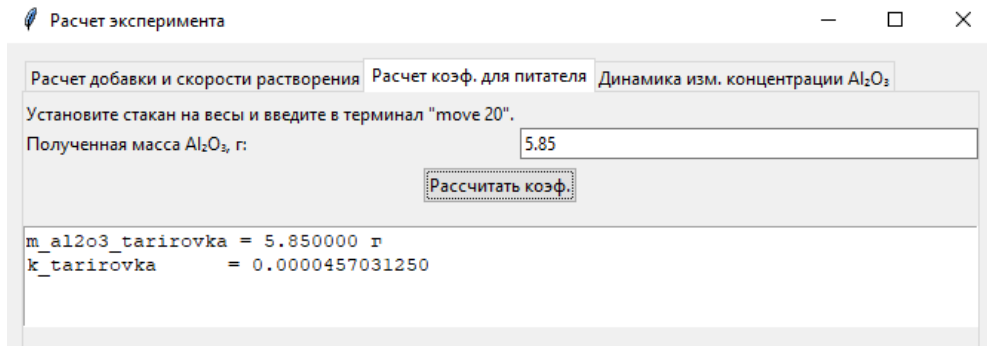


Рисунок 3.45 – Интерфейс программы для расчета параметров лабораторного эксперимента.

Вычисление калибровочного коэффициента для питателя АПГ.

Источник: материалы автора

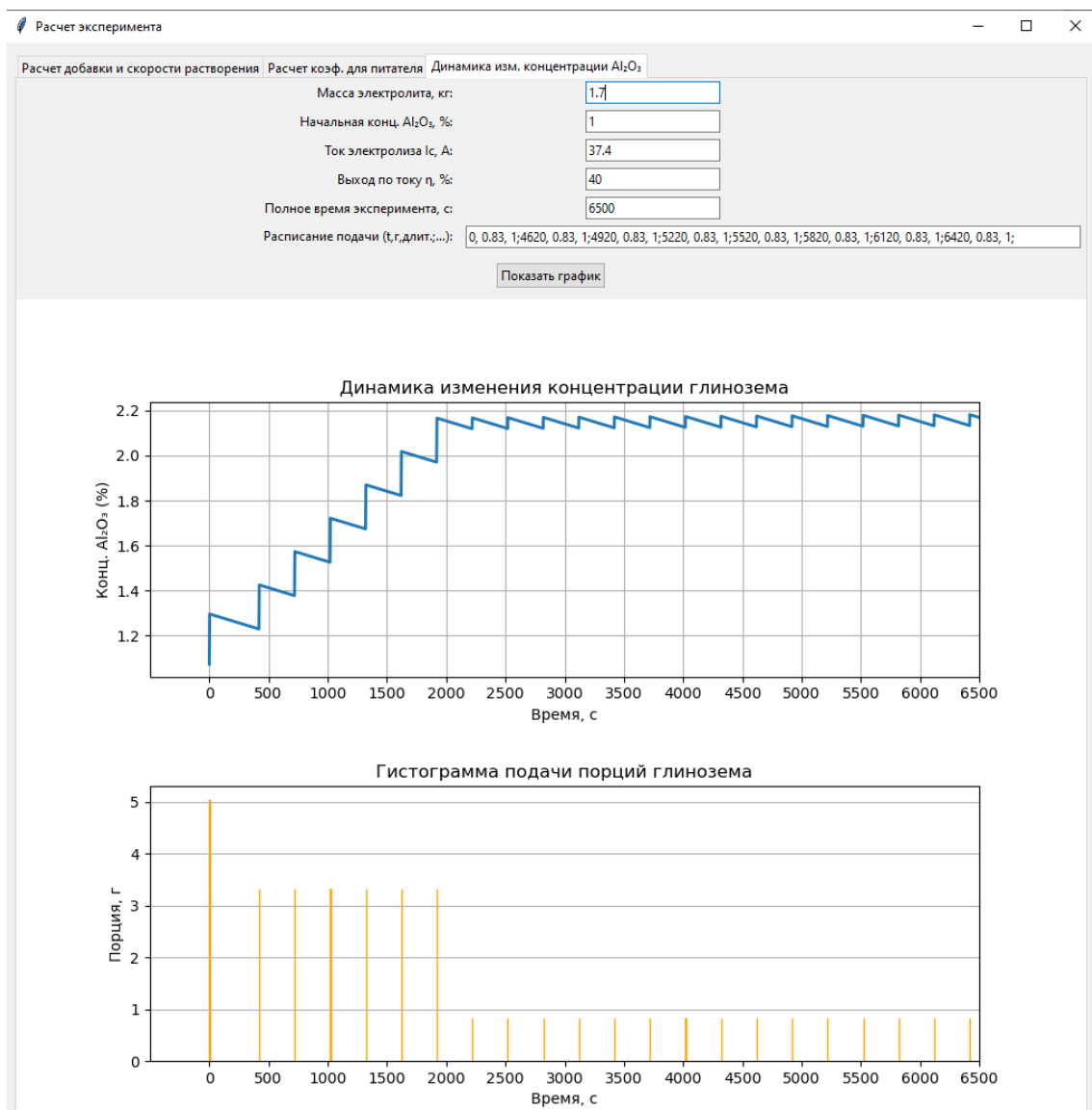


Рисунок 3.46 – Интерфейс программы для расчета параметров лабораторного эксперимента.

Расчет динамики изменения концентрации Al_2O_3 и гистограмма подачи порций глинозема.

Источник: материалы автора

3.4 Разработка автоматической системы измерения уровня электролита с использованием пневмоцилиндра АПГ

Процесс электролиза криолито-глиноземного расплава сопровождается образованием корки на поверхности электролита (рисунок 3.47). Корка, покрывающая криолито-глиноземный расплав, уменьшает тепловые потери, позволяет экономить электроэнергию. Кроме того, для улучшения теплоизоляции и улавливания выделяющихся вредных веществ (перфторуглероды, плавиковая кислота, смолистые вещества) образующуюся корку покрывают дополнительным слоем глинозема из-за его адсорбирующих свойств. Однако образующаяся корка препятствует поступлению глинозема в электролизную ванну.



Рисунок 3.47 – Корка криолито-глиноземного расплава. Источник: [72]

Для доставки глинозема в электролит применяются автоматические пробойные устройства (пневмоцилиндры) в точках питания, являющиеся частью АПГ, использование которых может приводить к скоплению глинозема на поверхности корки в случае ее не проламывания), так как контроль пробития корки не ведется (рисунок 3.48).

В научной литературе отсутствует информация о внедрении систем, позволяющих контролировать пробитие корки криолито-глиноземного расплава. Кроме того, измерение основных технологических параметров процесса электролиза осуществляются вручную раз в сутки (определение температуры электролита, криолитового отношения, уровней металла и электролита).

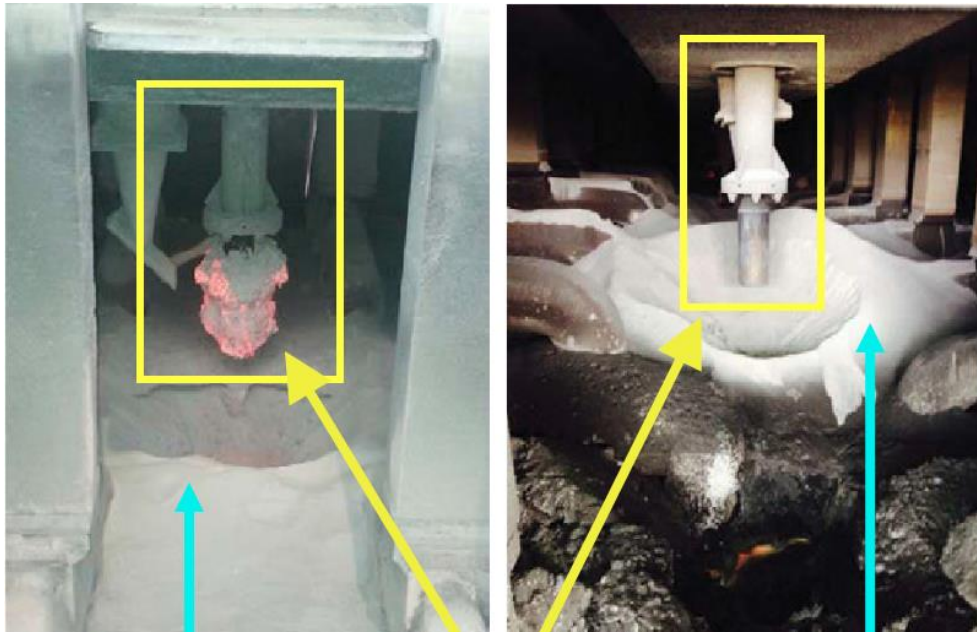


Рисунок 3.48 – Скопление глинозёма в точках питания вследствие не пробития корки.

Источник: [72]

Согласно научным публикациям, частота анодных эффектов (скорость возникновения) зависит от уровня электролита в ванне (рисунок 3.49). Это подчеркивает важность разработки автоматической системы определения уровней электролита и расплавленного металла.

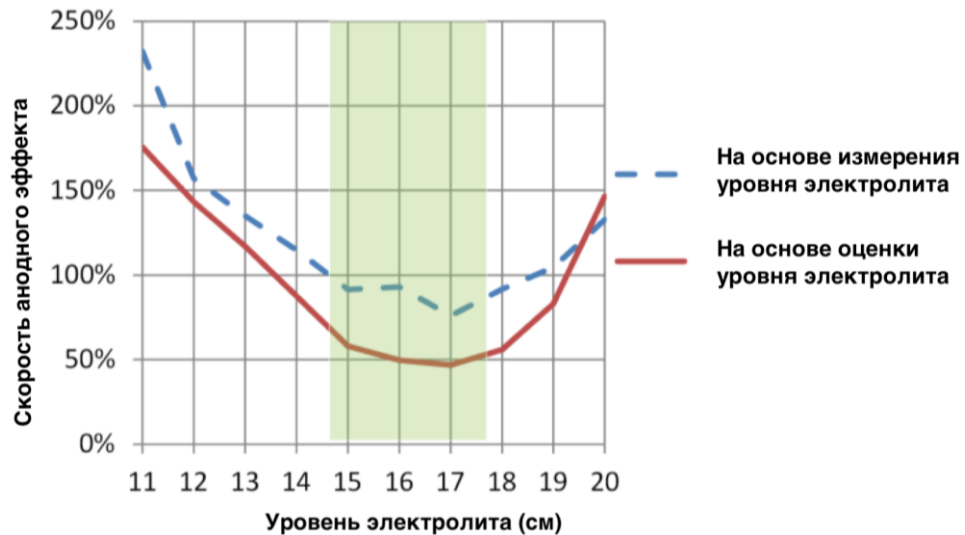


Рисунок 3.49 – Зависимость скорости образования анодного эффекта от уровня электролита.

Источник: [82]

Отсутствие автоматической системы сбора технологических параметров процесса электролиза, отсутствие контроля пробития корки, автоматической системы определения уровней электролита и металла послужили причиной разработки автоматической системы сбора и обработки данных алюминиевого электролизера с использованием многофункционального

пробойника, а также причиной разработки лабораторного стенда «Многофункциональное пробойное устройство электролизера для получения алюминия».

Целью разработки многофункционального пробойного устройства является повышение эффективности управления процессом производства алюминия в электролизерах за счет создания и применения технических решений для непрерывного автоматического мониторинга технологических параметров процесса электролиза криолито-глиноземного расплава в агрессивных условиях производства (высокая температура, магнитные поля), позволяющих повысить эффективность управления процессом производства алюминия в электролизерах, а также снижение частоты возникновения анодных эффектов.

Для этого необходимо модернизировать существующую систему АПГ.

Разрабатываемая система АПГ должна выполнять следующие задачи:

- 1) контролировать процесс пробития корки расплава электролита;
- 2) определять уровень электролита.

Идея работы заключается в использовании пробойного устройства в качестве электрически изолированного контура для измерения изменяющегося с глубиной погружения сопротивления криолито-глиноземного расплава. Отслеживание сопротивления позволяет контролировать процесс пробития корки (за счет обратной связи) и измерять (контролировать) уровни электролита.

В цепи измерения роль одного электрода играет наконечник пробойного устройства, второй электрод присоединен к катоду, расположенному на дне электролизной ванны. При касании наконечником пробойного устройства электролита замыкается измерительная электрическая цепь, которая сообщает о пробитии корки глинозема.

Для того чтобы на измерения электрических параметров не воздействовало падение серийного напряжения в общей цепи электролизеров, необходимо использовать изолированный пробойник системы АПГ.

Система контроля пробития корки позволит экономить ресурс пневмосистемы и энергию путем перевода пневматической системы пробойного устройства на работу с двумя давлениями (с высоким и низким). Обычный режим работы пробойного устройства осуществляется с низким давлением, и только в случае, если низкого давления недостаточно для пробития корки (информация о неудачной попытке автоматически поступает на вход ПЛК), предпринимается повторная попытка пробития с высоким давлением (переключение на высокое давление осуществляется автоматически с использованием трехходового двухпозиционного распределителя). Обратный ход поршня всегда осуществляется под высоким давлением.

Принцип работы пробойного устройства (короткое время погружения) позволяет использовать его не только как устройство для пробития корки, но и как подвижную платформу

для датчиков, тем самым избегая длительного пребывания датчиков в агрессивной среде. В связи с этим устройство можно рассматривать как многофункциональное.

Таким образом, разработанная система предоставляет возможность осуществлять периодический автоматический сбор параметров технологического процесса: температуры электролита, уровней электролита и металла, а также позволяет косвенно вычислять КО.

Косвенное вычисление КО осуществляется по формуле (3.15).

$$КО = N \cdot R_э \cdot \frac{S}{l_э} = N \cdot \frac{U \cdot S}{l_э \cdot I_э} \quad (3.15)$$

где N – частотный калибровочный коэффициент;

$R_э$ – расчетное электрическое сопротивление измеренного слоя электролита;

U – фиксированное напряжение, 24 В;

S – площадь контакта пробойника с электролитом;

$l_э$ – измеренный уровень электролита;

$I_э$ – измеренное значение силы тока.

Измерение значения силы тока $I_э$ производится при касании наконечника пробойника с электролитом.

Схема разработанного многофункционального пробойного устройства представлена на рисунке 3.50 [110].

Уровень электролита влияет на частоту наступления анодного эффекта, при котором происходит выброс ПФУ и резкое повышение напряжения на аноде. При низких значениях уровня электролита загружаемая системой АПГ порция Al_2O_3 не успевает раствориться и выпадает в осадок на подину электролизной ванны. Это приводит к снижению концентрации глинозема в расплаве, является основной причиной возникновения анодного эффекта и снижения выхода по току. При высоких значениях уровня электролита и постоянной частоте питания АПГ происходит снижение концентрации глинозема, что также приводит к возникновению анодного эффекта. Изменение уровня электролита происходит также вследствие его выпаривания. Таким образом, для снижения вероятности возникновения анодного эффекта необходимо поддерживать высоту слоя электролита (с учетом постоянно меняющегося уровня металла при наработке алюминия и его выливки) в определенных значениях для каждого типа электролизера. Кроме того, для получения лучших показателей выхода по току требуется работать на минимальных значениях КО (2,2 – 2,4), не приводящих к возникновению анодного эффекта.

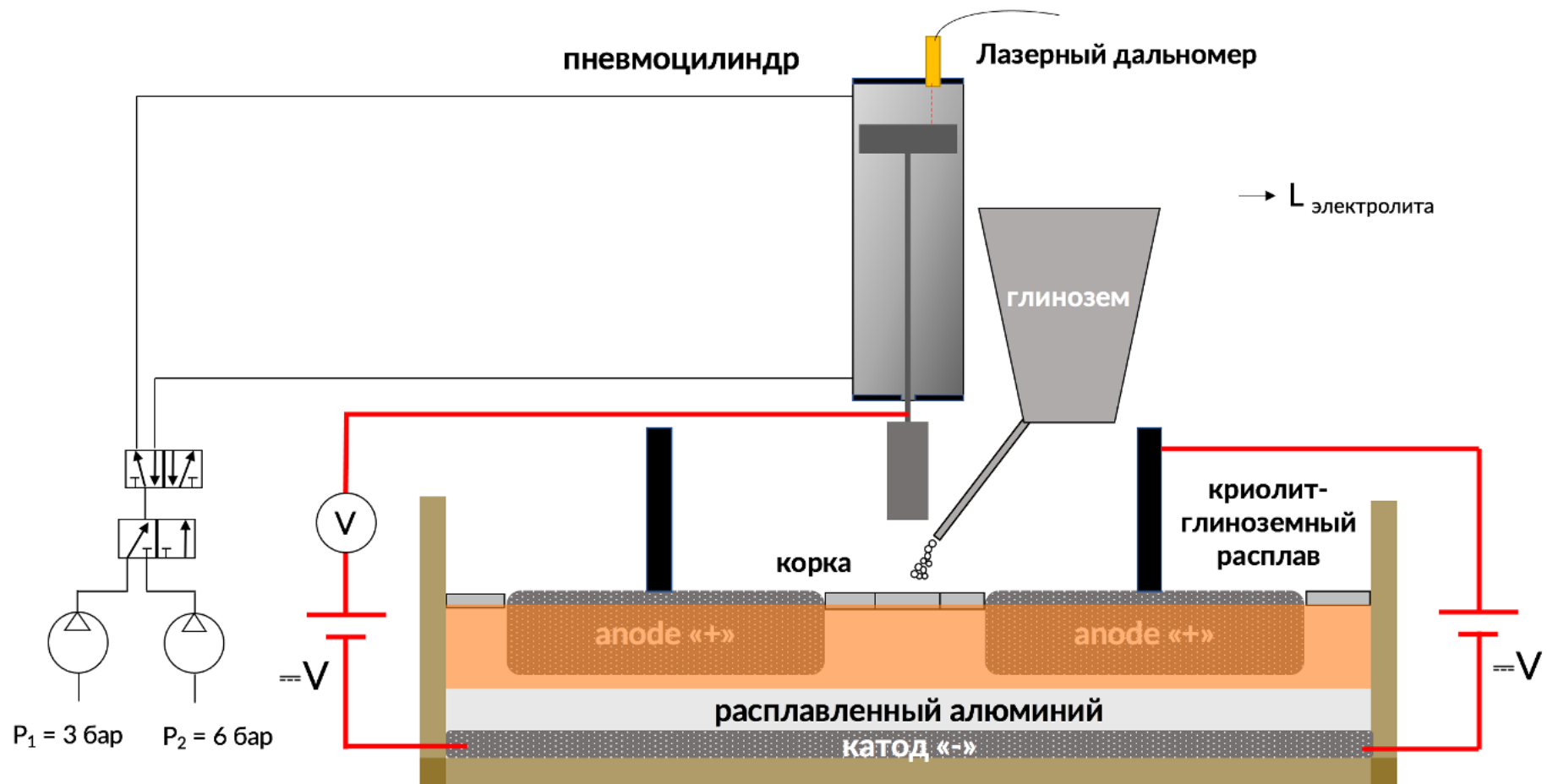


Рисунок 3.50 – Схема многофункционального пробойного устройства

Источник: разработано автором.

Обозначенные выше проблемы связанные с контролем уровня определяют необходимость разработки системы автоматического сбора и обработки данных алюминиевого электролизера – для автоматического измерения уровня электролита и мониторинга видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха. Измеренное текущее значение уровня электролита позволяет вычислять актуальную наименьшую необходимую порцию глинозема (частоту срабатывания АПГ), достаточную для ведения технологического процесса электролиза криолито-глиноземного расплава на низких значениях КО, что приводит к снижению частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов.

3.4.1 Выбор средства и способа измерения величины выдвижения штока пневмоцилиндра

Высокая температура процесса электролиза криолито-глиноземного расплава и агрессивная среда серьёзно ограничивают применение датчиков для определения уровня электролита. Для решения данной задачи были проанализированы следующие технические средства, устанавливаемые на пневмоцилиндр-пробойник АПГ для пробития криолито-глиноземной корки (скорость зарастания корки составляет от 0,2 мм/мин до 0,6 мм/мин):

- 1) Использование датчика Холла на пневмоцилиндре с внутренним потенциометром.

Достоинства: классический способ определения выдвижения штока пневмоцилиндра.

Недостатки: использование дискретных датчиков Холла, установленных в один ряд, что приводит к низкой точности измерения; невозможность применения в электролизном цехе из-за изменяющегося магнитного поля (МГД-нестабильность, изменение магнитного поля от проезжающего транспорта в цехе).

- 2) Использование подпружиненных роликов (3 штуки – с трех сторон), находящихся в постоянном контакте со штоком пневмоцилиндра. Валы роликов связаны с оптическим энкодером.

Достоинства: наличие механической связи; отсутствие влияния магнитного поля на измерение; снятие показаний при изгибе штока при помощи подпружиненных колесиков, установленных с трех сторон, позволят продолжать снимать показания во время изгиба штока пневмоцилиндра при пробитии корки.

Недостатки: проскальзывание роликов, их заклинивание, истирания штока, потеря герметичности пневмоцилиндра из-за высокой интенсивности пыления глиноземом в процессе питания.

- 3) Использование аналоговых датчиков: инфракрасных оптических, лазерных, ультразвуковых для определения расстояния до электролита в пробитой лунке (источник датчика направляется на открытую лунку в криолито-глиноземной корке)

Недостатки: интенсивное пыление глинозема, переменное магнитное поле и высокие температуры не позволяют использовать такие датчики.

- 4) Установка аналогового измерительного датчика (инфракрасного оптического, лазерного), обладающего минимальными размерами внутрь бесштоковой полости пневмоцилиндра, в «мертвый объем»¹ задней торцевой крышки (пространство между задней крышкой пневмоцилиндра и поршнем в конце хода) с изготовлением герметичного кабельного вывода. Источник инфракрасного света направляется на поршень пневмоцилиндра.

Достоинства: внутренняя полость не содержит пылевых частиц; отсутствие влияния магнитного поля на датчик (пневмоцилиндр является клеткой Фарадея).

Недостатки: точность датчика зависит от интенсивности инфракрасного излучения (т.е. точность измерения зависит от увеличения температуры среды); требуется калибровка датчика при рабочих температурах измерения.

3.4.2 Схема установки оптического дальномера в пневмоцилиндр АПГ

После анализа возможных способов и технических средств для определения глубины погружения ударного элемента пробойника и контроля уровня электролита, было решено использовать малогабаритный оптический (лазерный) дальномер, установленный в «мертвый объем» задней торцевой крышки (рисунок 3.51). Оптические датчики обеспечивают лучшую точность измерения по сравнению с ультразвуковыми датчиками и широко используются в металлургии. Техническим результатом является повышение точности контроля пробития криолито-глиноземной корки.

Устройство для пробивки криолито-глиноземной корки алюминиевого электролизера поясняется рисунком 3.51. На разработанное устройство подана заявка на патент [24].

¹ Пневматика для всех. От теоретических основ к практическим навыкам. Учебно-научный центр Samozzi – 2019. – 239 С.

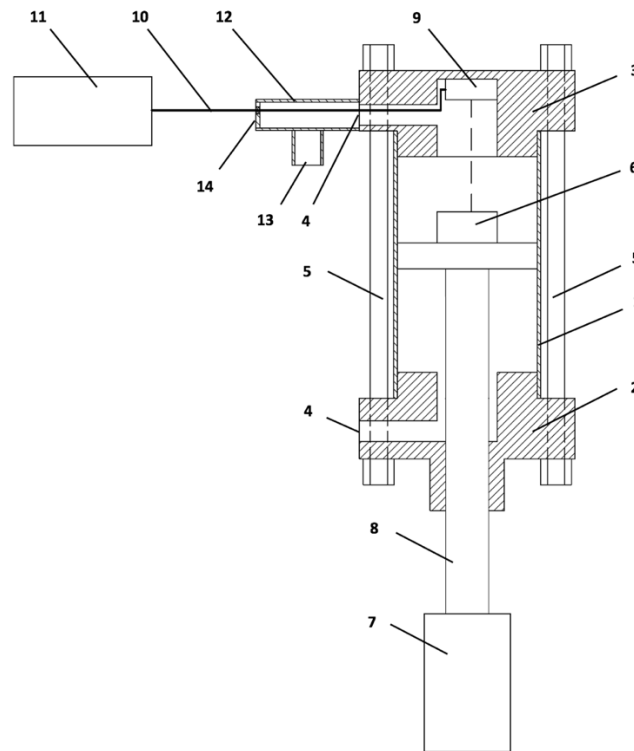


Рисунок 3.51 – Схема установки оптического дальномера в мертвый объем пневмоцилиндра: 1 – корпус; 2 – передняя крышка; 3 – задняя крышка; 4 – отверстия; 5 – крепеж; 6 – поршень; 7 – наконечник; 8 – шток; 9 – оптический дальномер; 10 – кабель; 11 – контроллер; 12 – тройник; 13 – вывод для подключения пневмолинии; 14 – герметичный ввод

Источник: разработано автором.

Устройство для пробивки криолито-глиноземной корки алюминиевого электролизера содержит корпус 1 выполненный в форме цилиндра, на котором крепежом 5 закреплена, с возможностью съема передняя крышка 2. В центре передней крышки 2 выполнено отверстие для штока 8, а в боковой поверхности отверстие 4 с возможностью подвода и отвода сжатого воздуха. С другой стороны корпуса 1 крепежом 5 закреплена, с возможностью съема задняя крышка 3, в центральной части внутренней поверхности задней крышки 3 выполнен паз, в который установлен с возможностью съема датчик для определения хода штока поршня цилиндра, в качестве которого используют оптический дальномер 9. Поршень 6 соединен со штоком 8, а затем с наконечником 7. Поршень 6 установлен с возможностью перемещения внутри корпуса 1. Выход оптического дальномера 9 соединен через кабель 10 со входом контроллера 11. В боковой поверхности в задней крышке 3 выполнено отверстие 4, в которое установлен с возможностью съема тройник 12, один из выходов которого является выводом для подключения пневмолинии 13 с возможностью подвода и отвода сжатого воздуха, а другой - герметичным вводом 14, в который установлен кабель 10.

Устройство для пробивки криолито-глиноземной корки алюминиевого электролизера устанавливается в систему АПГ на анодную раму и работает следующим образом. Поршень 6

приводится в действие сжатым воздухом, который поступает через вывод для подключения пневмолинии 13. Наконечник пробойного устройства 7 пробивает криолито-глиноземную корку (на фиг. не показано). В момент касания наконечника электролита происходит замыкание измерительной цепи (на рисунке не показано) и сигнал передается на контроллер 11. Оптический дальномер 9 фиксирует величину выдвижения штока 8, передает данные на контроллер 11, который в соответствии с алгоритмом автоматически пересчитывает величину выдвижения штока в высоту электролита.

Преимуществом оптического дальномера перед стандартным методом определения величины выдвижения штока пневмоцилиндра с использованием датчика Холла является возможность осуществления непрерывного измерения во всем диапазоне хода штока в переменном магнитном поле, возникающим в процессе электролиза криолито-глиноземного расплава и вносящим ошибки в процесс измерения при использовании датчиков Холла.

3.4.3 Принцип работы автоматической системы измерения уровня электролита с использованием малогабаритного оптического дальномера

В промышленных пневматических системах для смазки исполнительных устройств используется масляный туман, поэтому алгоритм работы предусматривает перекалибровку оптического дальномера по крайним точкам выдвижения штока пневмоцилиндра раз в сутки.

Так как источник инфракрасного света оптического дальномера направлен на поршень пневмоцилиндра, то для определения уровня электролита требуется пересчитывать значения относительно высоты установки пневмоцилиндра.

Для автоматического определения момента касания наконечником пробойного устройства в конструкцию электролизера добавляется измерительная электрическая цепь переменного тока, один из контактов которой крепится к блоку (катоде) электролизной ванны, а второй контакт закрепляется на электрически изолированном от корпуса электролизера многофункциональном пробойном устройстве АПГ (рисунок 3.52).

При касании наконечником пробойного устройства АПГ электролита происходит замыкание измерительной электрической цепи, следовательно, можно судить о успешном пробитии криолито-глиноземной корки.

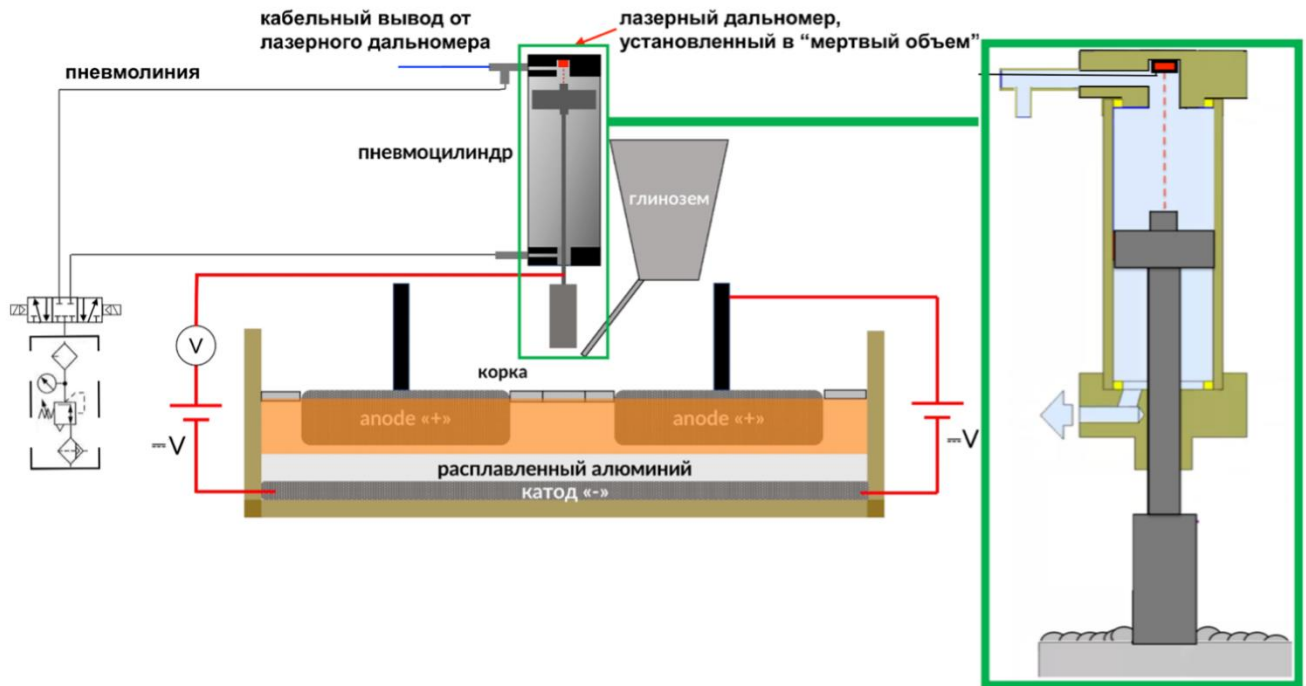


Рисунок 3.52 – Схема установки малогабаритного оптического дальномера

Источник: разработано автором.

Согласно данным с производства, в промышленных условиях пробойное устройство АПГ нагревается в диапазоне $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому перед началом эксперимента показания оптического дальномера были откалиброваны при температуре пневмоцилиндра $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.4 Методика эксперимента по исследованию точности оптического дальномера при температуре выше $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для проведения исследования возможности использования оптического дальномера с целью определения уровня электролита (величины выдвигения штока цилиндра) в процессе электролиза КГР был собран лабораторный стенд (рисунок 3.53), состоящий из пневмоцилиндра двухстороннего действия Camozzi 40M2L080A0100 с длиной хода штока 100 мм, диаметром поршня 80 мм с установленными в бесштоковую полость пневмоцилиндра оптическим дальномером TOF200C-VL53L0X (рисунки 3.54 и 3.55). Размеры датчика: 20 x 11 x 4 мм, диапазон измерения: 0 мм до 2000 мм, длина волны 940 нм, датчик измеряет расстояния путем определения «времени полёта» излучаемого пучка света ToF – Time-of-flight.

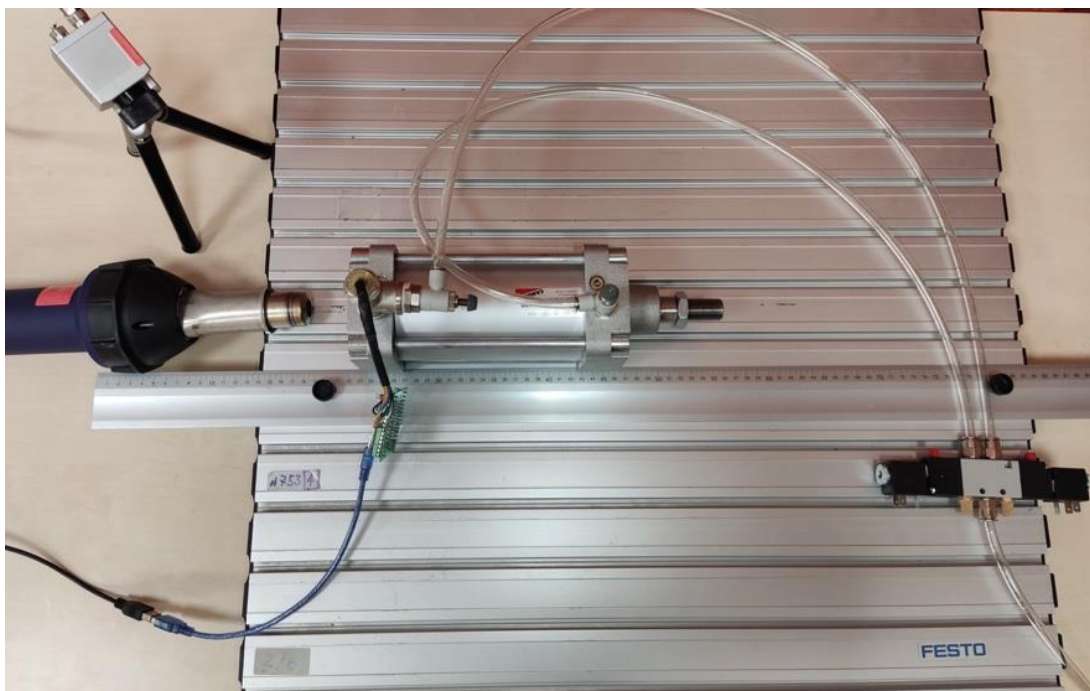


Рисунок 3.53 – Лабораторный стенд исследования зависимости показаний оптического дальномера от нагрева для отслеживания величины выдвижения штока пневмоцилиндра.

Источник: материалы автора.



Рисунок 3.54 – Внешний вид ToF датчика расстояния TOF200C-VL53L0X.

Источник: материалы автора.

Также в бесштоковую полость был установлен датчик SHT40 для контроля температуры внутри цилиндра (диапазон измерения: - 40°C до + 125°C). Подключение датчиков к микроконтроллеру ATmega328P выполнено через герметичный кабельный вывод по интерфейсу I²C.

Управление выдвижением штока пробойника осуществляется при помощи бистабильного электропневматического (распределителя CAMOZZI 368-011-02IL 5/3-1/8 с закрытой центральной позицией, подсоединенного к пневмолинии 5 атм и двумя соленоидами CAMOZZI U73 DC 24V. Для нагрева пневмоцилиндра до 120 °C использовался термофен Weldy с плавной регулировкой температуры от 100 °C до 600 °C, а для контроля нагрева корпуса пробойника применялся инфракрасный тепловизор OptrisRPI 200. Определение действительной величины выдвижения штока пробойника осуществлялось поверенной лабораторной линейкой.



Рисунок 3.55 – Задняя крышка пневмоцилиндра. Место установки оптического дальномера и датчика температуры (в «мертвом объеме» пневмоцилиндра)

Источник: материалы автора.

3.4.5 Результаты эксперимента

Лабораторный эксперимент состоял в фиксировании значений положения штока, получаемых с оптического дальномера, а также при помощи поверенной лабораторной линейки при различной величине выдвижения штока. Дополнительно измерялись значения температуры внутри бесштоковой полости пневмоцилиндра, получаемые с датчика температуры, установленного вместе с оптическим дальномером. Внешняя температура пневмоцилиндра поддерживалась в диапазоне 110 – 125 °С и контролировалась инфракрасным тепловизором OpttrisRPI 200 (рисунок 3.56).

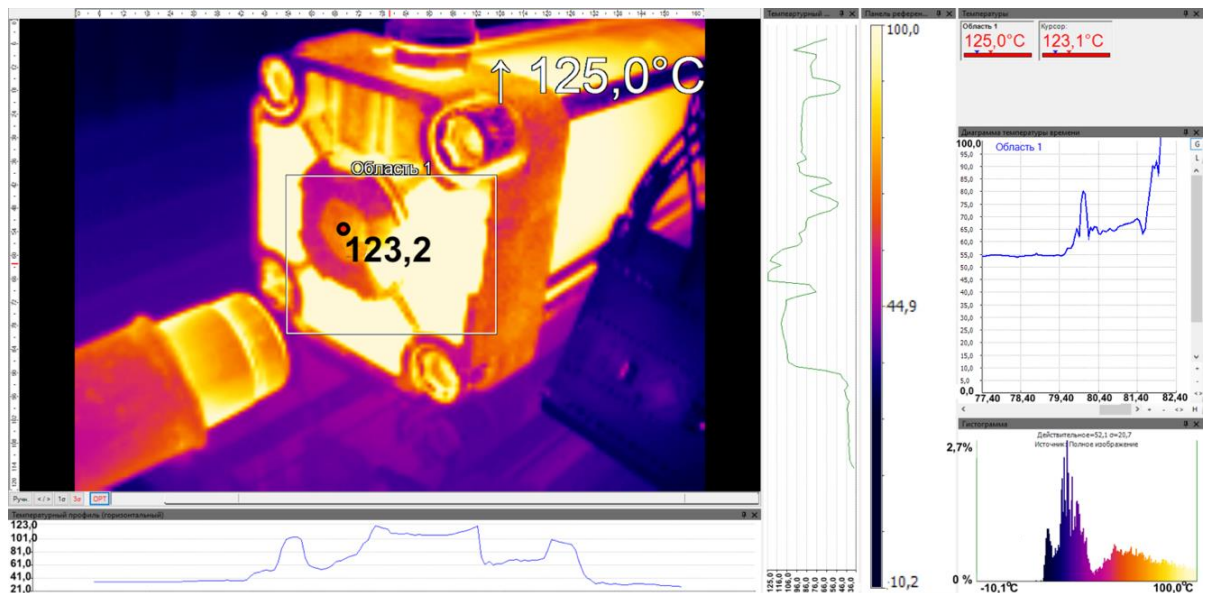


Рисунок 3.56 – Контроль нагрева пробойного устройства инфракрасным тепловизором.

Источник: материалы автора.

Результаты исследования (рисунок 3.57) показали, что оптический дальномер TOF200C-VL53L0X способен работать при внешней температуре пневмоцилиндра до 125 °С (108 °С внутри бесштоковой полости пневмоцилиндра). Выдвижение штока пневмоцилиндра приводит к снижению температуры внутри пневмоцилиндра на 4 °С вследствие поступления холодного воздуха [100].

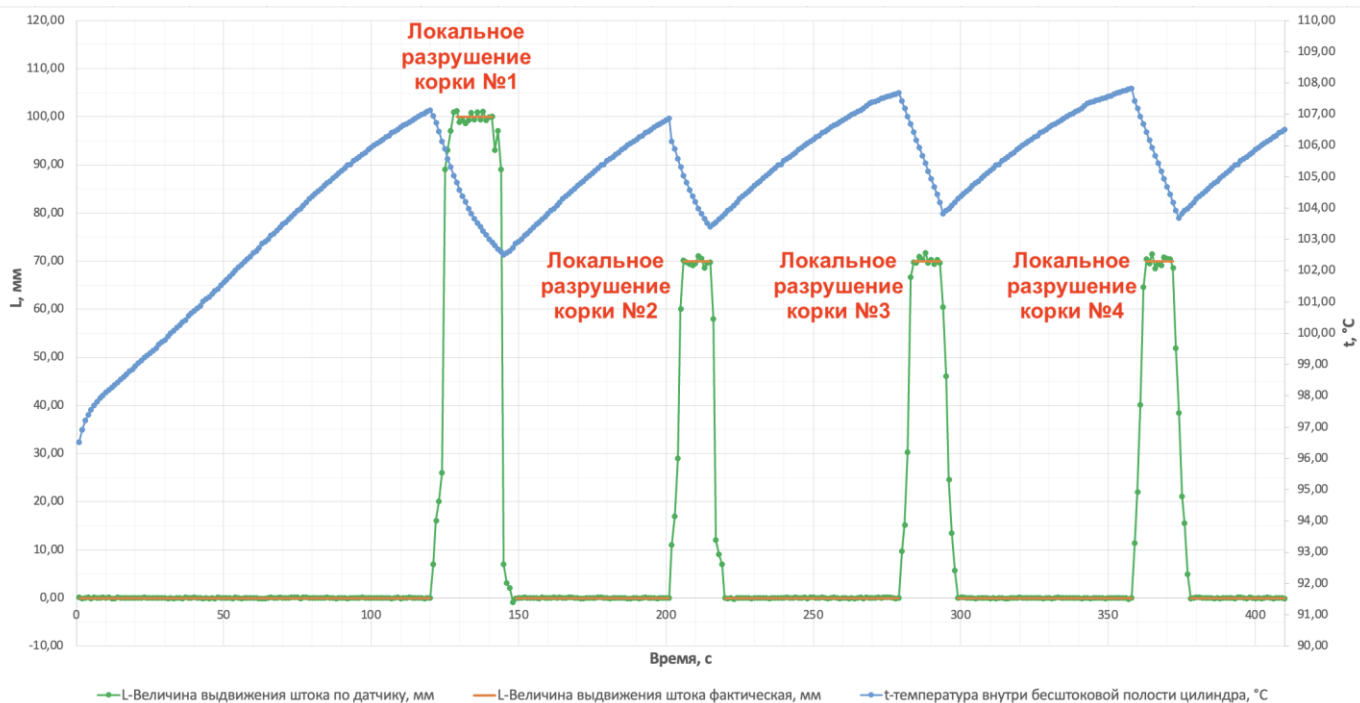


Рисунок 3.57 – Сравнение значений величины выдвижения штока пробойного устройства полученными с оптического дальномера TOF200C-VL53L0X при нагреве до 125 °С, с действительными значениями (фрагмент эксперимента). Источник: материалы автора, по результатам эксперимента.

Погрешность измерения хода штока поршня цилиндра, определяемого с использованием оптического дальномера, характеризуем относительной погрешностью, равной максимальному расхождению между измеренным и действительным значениями по формуле (3.16):

$$\delta = \left| \frac{\Delta}{X_d} \right| \cdot 100 = \left| \frac{X_{\text{изм_max}} - X_d}{X_d} \right| \cdot 100 = \left| \frac{101,85 - 100}{100} \right| \cdot 100 = 1,85\% \quad (3.16)$$

где Δ – абсолютная погрешность, мм;

$X_{\text{изм_max}}$ – максимальное значение с датчика, мм;

X_d – действительное (истинное) значение измеряемой величины, мм.

Максимальное значение относительной погрешности датчика при температурах от 110 °С до 125 °С составила 1,85 %.

После расчета уровня электролита в соответствии с алгоритмом, контроллер осуществляет расчет уставки порции глинозема, подаваемой в электролизную ванну.

Автоматическое измерение уровня электролита с учетом изменения высоты слоя металла (наработка алюминия по времени и его выливка) позволяет точно управлять концентрацией глинозема за счет изменения интервала питания АПГ по формулам (3.17) и (3.18), осуществлять технологический процесс без возникновения анодных эффектов, голодания электролизера и выпадения глинозема в осадок.

$$A = M_{el} \cdot \frac{\Delta C}{100} = (\rho \cdot L_b \cdot B_b \cdot h_{el}) \cdot \frac{\Delta C}{100}, \quad \text{кг} \quad (3.17)$$

где A – разовая доза глинозема, загружаемая в электролизер, кг;

ΔC – отклонение концентрации глинозема от заданного уровня C , % (мас.);

M_{el} – масса электролита в ванне, кг;

ρ – плотность электролита, г/см³;

L_b – длина электролизной ванны, м;

B_b – ширина электролизной ванны, м;

h_{el} – высота слоя электролита, м.

$$T = \frac{A}{P} = \frac{A}{q \cdot I \cdot \eta_t \cdot \frac{\vartheta}{60}}, \quad \text{с} \quad (3.18)$$

где T – период питания ванны глиноземом;

A – разовая доза глинозема, загружаемая в электролизер, кг;

P – скорость потребления глинозёма в электрохимической реакции, кг/мин;

q – электрохимический эквивалент алюминия, равный 0,336 кг/кА·ч;

I – сила тока, кА;

η_t – выход по току, ед.;

ϑ – удельный расход глинозёма, кг/кг Al;

60 – число минут в часе.

Стоит отметить, что автоматическая система определения уровня электролита разработана не для замены существующей системы управления АПГ, а в качестве дополнения к ней. Система используется для расчета порции глинозема (путем изменения интервала питания АПГ).

Также автоматическое определение уровня электролита позволяет точнее дозировать автоматическую подачу дробленого электролита (при наличии бункеров с дроблённым электролитом).

3.4.6 Сравнение срока службы наконечника пробойного устройства различных устройств для разрушения корки

Срок службы до замены стального наконечника пробойного устройства системы АПГ в традиционной автоматической системе (без контроля процесса разрушения корки) составляет 12 месяцев. Замена наконечника требуется из-за механических и коррозионных воздействий (рисунок 3.58).

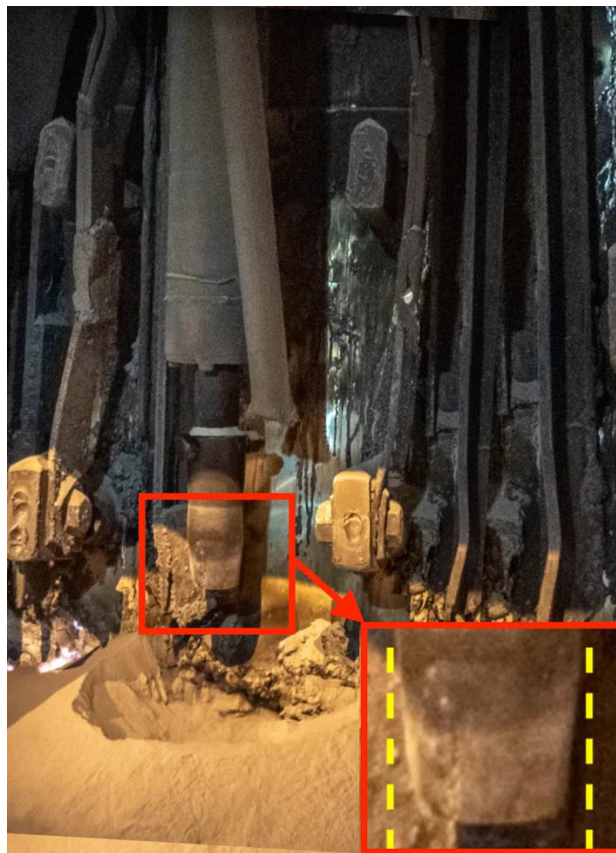


Рисунок 3.58 – Износ наконечника пробойного устройства АПГ

Источник: материалы автора

В системе без контроля процесса разрушения корки наконечник погружается в электролит на половину своей высоты на 0,6 с (данные получены из производственного опыта). При этом, согласно алгоритмам питания, новая порция глинозема поступает в электролит 1 раз в минуту. Для расчета времени нахождения наконечника пробойного устройства в расплаве электролита в течение 12 месяцев рассчитывается по формуле (3.19):

$$0.6 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \div 3600 = 87.6 \text{ ч/год} \quad (3.19)$$

В разработанной системе многофункционального устройства для разрушения корки криолито-глиноземного расплава, питание подается раз в минуту и измеряется уровень электролита. На основании лабораторных испытаний известно, что во время операции пробития корки, наконечник пробойного устройства находится в электролите в течение 0,25 с. Таким образом, общая продолжительность нахождения наконечника в расплаве составляет (3.20):

$$0.25 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \div 3600 = 36.5 \text{ ч/год} \quad (3.20)$$

Исходя из расчетов, можно сделать вывод, что предлагаемая система многофункционального устройства для пробития криолито-глиноземной корки увеличивает срок службы наконечника пробойного устройства системы АПГ в 2,4 раза. Срок службы наконечника в предлагаемой системе до 30 месяцев.

3.4.7 Экономический эффект от установки многофункционального пробойного устройства системы АПГ алюминиевого электролизера.

По результатам производственного опыта Богучанского алюминиевого завода, использование разработанной системы позволяет повысить эффективность тока на 0,7 %. Эффективность тока повышается за счет использования автоматической системы измерения уровней электролита и расплавленного металла в электролизере, а также за счет использования автоматической системы измерения температуры электролита. Это позволяет более точно поддерживать минимально допустимое значение МПР, не допуская локального перегрева электролита.

Увеличение эффективности тока на 0,7% приведет к повышению производительности (3.21):

$$P = k \cdot I \cdot \eta \cdot \tau \quad (3.21)$$

где k – электрохимический эквивалент алюминия, равный 0,336 кг/кА·ч;

I – сила тока, кА;

η – выход по току, %;

τ – количество времени (8 760 ч/год).

Для одной электролизной ванны увеличение эффективности составит (3.22):

$$P = 0.3356 \cdot 320 \cdot 0.007 \cdot 8\,760 = 6\,585.28 \frac{\text{кг}}{\text{год}} \quad (3.22)$$

Увеличение эффективности для завода с 792 электролизерами рассчитаем по формуле (3.23):

$$P = 6\,585.28 \cdot 792 = 5\,215\,541.76 \frac{\text{кг}}{\text{год}} \quad (3.23)$$

или 5.215 тысяч т/год.

Дополнительный доход от увеличения объемов производства составит (3.24):

$$R = 5\,215\,541.76 \cdot 2\,028 = \$10\,577 \text{ миллионов в год} \quad (3.24)$$

где \$2028 – цена одной тонны алюминия на Лондонской бирже металлов по состоянию на 20.12.2020 в долларах США.

Стоимость внедрения многофункционального устройства для разрушения криолито-глиноземной корки представлена в таблице 3.2 .

Таблица 3.2 – Стоимость внедрения многофункционального устройства для разрушения коры на примере для Богучанского алюминиевого завода

Статья затрат	Стандартные системы АПГ	Система АПГ с многофункциональным пробойным устройством	Разница
Стоимость оборудования на 1 электролизер, тыс. руб	551	786	235
Стоимость оборудования на все электролизеры цеха, тыс. руб	436 395	623 083	186 688
Затраты на внедрение новой технологии, тыс. руб		163 520	163 520
Итого, тыс. руб	436 395	786 603	350 208

Результаты расчетов показали, что разработанная система многофункционального устройства для разрушения корки является экономически эффективной и срок окупаемости составит менее 13 месяцев.

Данное устройство работает при пониженном давлении 3 атм вместо высокого давления в сети подачи сжатого воздуха. Как правило, если в корке электролита есть отверстие, для пробития требуется небольшое давление. Это позволяет экономить сжатый воздух.

Расход сжатого воздуха для цилиндра с диаметром поршня 200 мм, диаметром штока 40 мм и ходом 400 мм, работающего при высоком давлении 6 атм (процесс разрушения корки происходит раз в минуту), рассчитывается по формуле (3.25):

$$Q = \frac{(P_s + 1)}{1000 \cdot P_0} \cdot s \cdot (A1 + A2) \cdot n \quad (3.25)$$

где P_s – давление питания (атм);

P_0 – атмосферное давление (атм);

$A1$ – площадь поршня (см²);

$A2$ – площадь штоковой полости (см²);

s – ход поршня (см);

n – количество циклов в минуту (цикл/мин);

Q – расход сжатого воздуха (нормальный) (л/мин).

В этом случае расход сжатого воздуха составит (3.26):

$$Q = \frac{(6 + 1)}{1000 \cdot 1} \cdot 40 \cdot (314 + 301.5) \cdot 1 = 172.34 \text{ л/мин} \quad (3.26)$$

Расход сжатого воздуха для того же цилиндра с использованием многофункционального устройства для разрушения корки, работающего при пониженном давлении 3 атм и возврате с уровня электролита, уменьшает ход на 50 мм, рассчитывается по формуле (3.27):

$$Q = \frac{(3 + 1)}{1000 \cdot 1} \cdot 35 \cdot (314 + 301.5) \cdot 1 = 86.17 \text{ л/мин} \quad (3.27)$$

Таким образом, использование многофункционального устройства для пробития корки приводит к экономии сжатого воздуха в 2 раза.

При пониженном давлении уменьшается износ уплотнений цилиндра и увеличивается срок его службы. Это приводит к снижению затрат на техническое обслуживание пробойного устройства системы АПГ.

Алгоритм работы многофункционального пробойного устройства с установленным внутри оптическим дальномером представлен на рисунке 3.59.

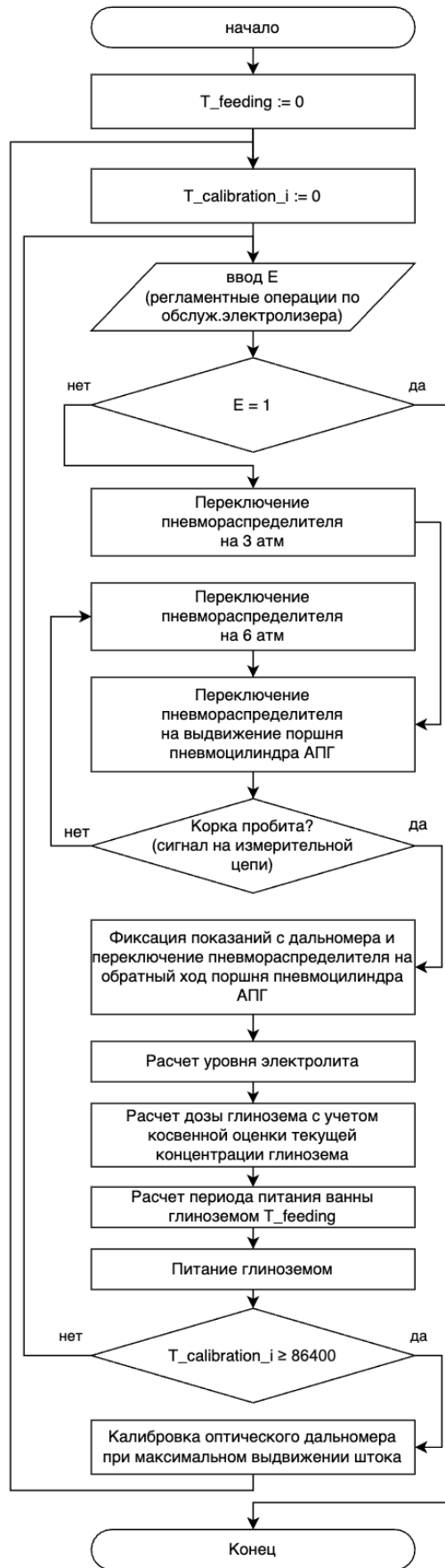


Рисунок 3.59 – Алгоритм работы многофункционального пробойного устройства с установленным внутри оптическим дальномером.

Источник: разработано автором.

3.5 Выводы по Главе 3

В ходе экспериментов по электролизу КГР с использованием метода БПФ установлены преобладающие низкие частоты и их амплитуды, характерные для следующих значений содержания глинозема в расплаве:

$C_{Al_2O_3} = 0,5 \%$ основной пик находится вблизи 0,05 Гц, амплитуда составляет 0,003 В;

$C_{Al_2O_3} = 1,0 \%$ основной пик находится вблизи 0,05 – 0,1 Гц, амплитуда составляет 0,0016 В;

$C_{Al_2O_3} = 1,5 \%$ основной пик находится вблизи 0,25 – 0,3 Гц, амплитуда составляет 0,0015 В;

$C_{Al_2O_3} = 2,0 \%$ частоты равномерно распределены в диапазоне 0,2 – 0,6 Гц, амплитуда составляет 0,009 – 0,011 В;

$C_{Al_2O_3} = 2,5 \%$ основной пик находится на частоте 0,35 – 0,4 Гц, амплитуда составляет 0,002 В;

$C_{Al_2O_3} = 3,0 \%$ основной пик находится на частоте 0,5 Гц, амплитуда составляет 0,002 В;

$C_{Al_2O_3} = 3,5 \%$ основной пик находится в диапазоне 0,95 – 1 Гц, амплитуда составляет 0,00055 В.

Разработанное многофункциональное пробойное устройство для автоматического определения уровня электролита позволяет решить проблемы низкой адекватности измерительных комплексов в алюминиевой промышленности, вести технологический процесс на низких значениях КО благодаря постоянной автоматической корректировке периода питания электролизной ванны глиноземом с минимальной вероятностью возникновения анодных эффектов.

Использование оптического дальномера, помещенного внутрь цилиндра АПГ, позволяет производить измерения в менее агрессивной среде и в автоматическом режиме с максимальной погрешностью не более 2 %, тем самым исключить необходимость разгерметизации электролизера и нарушения теплового режима ванны при ручных измерениях. Разработан алгоритм работы пробойного устройства с установленным внутри оптическим дальномером.

Опускание пробойного устройства только до уровня электролита дает несколько преимуществ. Поскольку наконечник пробойника не погружается в электролит, он меньше нагревается, снижая вероятность налипания электролита на наконечник. Это также снижает вероятность блокирования подачи глинозема в электролит и возникновения анодных эффектов. Срок службы наконечника пробойного устройства для разрушения корки увеличивается, и, как следствие, снижаются затраты на его обслуживание. Качество алюминия улучшается, так как в него не попадают стальные примеси от наконечника пробойного устройства АПГ.

Важным аспектом концепции эффективного управления мощным алюминиевым электролизером является организация работы без анодных эффектов. Предлагаемая система (контроль пробития криолито-глиноземной корки) позволяет снизить частоту возникновения АЭ. Например, благодаря низкому потреблению сжатого воздуха, можно производить одновременную работу всех цилиндров, если необходимо погасить возрастающее напряжение,

вызывающее анодный эффект. Также низкий расход сжатого воздуха позволяет подавать глинозем в электролизную ванну чаще и небольшими порциями. Это позволяет добиться большей стабильности концентрации глинозема, растворенного в электролите.

ГЛАВА 4 СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИДИМЫХ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭЛЕКТРОЛИЗНОМ ЦЕХЕ АЛЮМИНИЕВОГО ЗАВОДА

4.1 Системы и методы очистки выделяемых вредных веществ

Одним из технологических параметров, который подлежит контролю, является загрязненность воздуха в электролизном цехе. Широкое применение систем сухой газоочистки позволило добиться значительного повышения качества фильтрации отходящих газов в результате процесса электролиза криолито-глиноземного расплава, а также повысить качество воздуха в электролизном цехе. Однако остаются внештатные ситуации, когда вредные вещества (фтористый водород HF, твердые фториды F, диоксид серы SO₂, смолистые вещества, бензапирен C₂₀H₁₂, углекислый газ CO₂, пыль, а также ПФУ CF₄, C₂F₆) попадают в атмосферу электролизного цеха по причине разгерметизации электролизера (например, оставленная снятой боковая створка укрытия электролизера после его обслуживания), при нарушении сплошности криолито-глиноземной корки, возникновении длительного анодного эффекта или в результате отклонения в работе системы сухой газоочистки. Выбросы вредных веществ сопровождаются видимым облаком. Такие ситуации требуют немедленного вмешательства персонала электролизного цеха.

Для снижения выбросов загрязняющих веществ производители алюминия предпринимают следующие шаги:

1) снижают долю электролизеров Содерберга с самообжигающимися анодами, которые не отвечают современным экологическим требованиям;

2) устанавливают в существующие электролизеры Содерберга систему АПГ, таким образом делают их более экологичными;

3) увеличивают количество электролизеров с технологией предварительно обожжённых анодов с системой АПГ, которые не выделяют смолистые вещества. Данные электролизеры обладают лучшей герметичностью, имеют шторные укрытия;

4) внедряют системы автоматического гашения анодных эффектов без разгерметизации электролизной ванны;

5) для производства анодной массы и обожжённых анодов используют нефтяные коксы [9, 10], которые обладают низкой зольностью;

6) модернизируют и внедряют системы сухой газоочистки.

7) ведутся разработки технологии электролиза с применением инертного анода.

В результате этапов экологической модернизации в России за последние 15 лет произошло снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу на 36 тысяч тонн.

4.2 Состав вредных веществ, выделяемых в атмосферу в результате процесса электролиза

Количество выделяемых в атмосферу загрязняющих веществ при производстве одной тонны алюминия представлено в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Удельные выбросы загрязняющих веществ в электролизерах с обожжёнными анодами

Мощность электролизера с обожжёнными анодами, кА	Удельные выбросы загрязняющих веществ в электролизерах с обожжёнными анодами, кг/т Al				
	HF	F _{hard}	Пыль	SO ₂	Парниковые газы
< 300	≤ 0,35	≤ 0,75	3,4 – 4,9	до 30	1,9 – 2,2
> 300	0,21 – 0,23	≤ 0,37	2,2 – 2,7	до 30	1,5 – 1,7

Общий объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за 2020 г. предприятиями ОК РУСАЛ составил 352,4 тыс. тонн (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу предприятиями ОК РУСАЛ за 2023 г.

Загрязняющее вещество	Количество, тыс. тонн
Оксид углерода (CO)	238,7
Твердые вещества (кр. F _{тв.} , смолистых в-в, б(а)п)	36,3
Диоксид серы (SO ₂)	40,1
Сумма оксидов азота как двуокись азота (NO ₂)	20,1
Прочие выбросы	9,3
Фтор суммарный (фтор газообразный и твердый)	6,4
Летучие органические соединения (ЛОС)	1,5
Бензапирен	0,0041

Несмотря на отличные результаты работы современных систем сухой газоочистки, в электролизном цехе могут происходить внеплановые выбросы загрязняющих веществ, сопровождающиеся задымлением атмосферы электролизного цеха. Появление задымления может сигнализировать о нарушении работы системы газоочистки, разгерметизации алюминиевого электролизера при снятии боковых створок для обслуживания, нарушении укрытия анодного массива или возникновении анодного эффекта. Такие ситуации требуют немедленного вмешательства персонала.

Традиционные автоматические системы обнаружения выбросов используют датчики газа, однако такие системы могут быть недостаточно эффективны из-за большой площади цеха и неравномерности распространения выброса. Поэтому важной частью работы, направленной на

снижение эмиссии выбросов загрязняющих веществ, является разработка автоматической системы контроля видимых выбросов в электролизном цехе, позволяющей увеличить скорость обнаружения. Система мониторинга выбросов совместно с системами газоочистки позволит снизить след от побочных продуктов электролиза криолито-глиноземного расплава, уменьшить негативное влияние на изменение экологии Земли.

Несмотря на тяжелые производственные условия процесса электролиза криолито-глиноземного расплава, такие как высокая температура электролита (960 °С), сильные магнитные поля, известны успешные попытки использования систем технического зрения для определения химического состава электролита, криолитового отношения, концентрации глинозема по яркости расплава. Кроме систем технического зрения широкое распространение в промышленности находят нейронные сети.

4.3 Лабораторный стенд для сбора данных для обучения нейронной сети

В данном исследовании рассматривается возможность применения системы технического зрения на основе нейронной сети в качестве автоматической системы обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе.

Для тренировки нейронной сети требуется большой массив размеченных фотографий. Качество разрабатываемой автоматической системы обнаружения выбросов зависит от объема и качества выборки для тренировки нейронной сети. Поэтому важным этапом при разработке автоматической системы является сбор и подготовка массива изображений, который должен содержать информацию об объекте в различных условиях. То есть необходимо подготовить фотографии электролизера с различных сторон, при разной освещенности и степени задымления.

Так как заводы по производству алюминия не ведут видео- и фотофиксацию видимых выбросов, для генерации набора изображений для обучения нейронной сети был собран лабораторный стенд, состоящий из масштабной модели электролизера, камеры и генератора дыма (рисунок 4.1).

Генератор представляет собой коробку с двумя отверстиями, внутри которой находится подключенная к аккумулятору металлическая спираль с фитилем из хлопка. Фитиль пропитан жидкостью, состоящей из пропиленгликоля и глицерина. К одному из отверстий представлен электрический вентилятор, а к противоположному отверстию подключена гибкая резиновая трубка с регулируемым вентилем для подачи и дозирования дыма на масштабную модель электролизера. Камера была закреплена на штативе напротив модели электролизера. Используемая масштабная модель имеет геометрическое подобие и исследуемое физическое свойство объекта (незапланированные выбросы загрязняющих веществ), что является важным при выполнении физического моделирования.

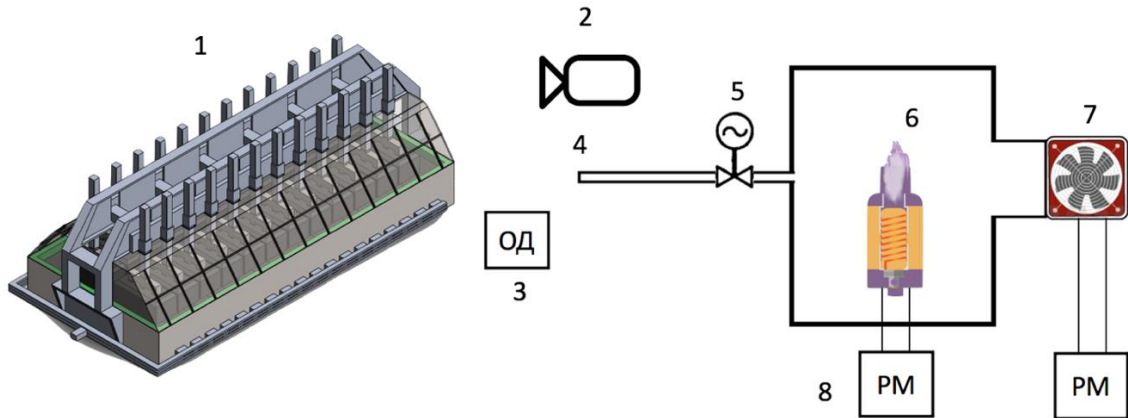


Рисунок 4.1 – Схема лабораторного стенда. 1 – макет электролизера; 2 – камера; 3 – оптический датчик; 4 – гибкая резиновая трубка; 5 – регулируемый вентиль; 6 – металлическая спираль с фитилем; 7 – электрический вентилятор; 8 – регулятор мощности

Источник: разработано автором

Съемка фотографий осуществлялась с промежутком в 5 секунд одновременно с подачей дыма в разные части модели электролизера, с разной концентрацией дыма (от $0,5 \text{ г/м}^3$ (редкий дым) до 3 г/м^3 (густой дым), различного размера облака (от $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ до $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2$) и с различной освещенностью (от 20 до 6000 лк). После этого меняли положение электролизера на 10° и снова повторяли съемку. Изменение положения макета и интенсивности дыма, изменение освещенности позволяют имитировать реальные промышленные условия. Таким образом, был собран массив данных с уникальными комбинациями свойств объекта.

Для обучения и тестирования нейронной сети было собрано 1000 фотографий макета электролизера. Из них 800 фотографий (80%) использовались для обучения нейронной сети и 200 фотографии (20%) для тестирования. Предварительно был создан класс «Emissions» и произведена разметка фотографий т.е. выделение дыма на фотографии и присвоение класса.

4.4 Методика обучения нейронной сети

Для задачи распознавания дыма было решено использовать сверточную нейронную сеть (Convolutional Neural Network), а именно Feature Pyramid Net (FPN). Данная нейронная сеть показывает наилучшие результаты для задач связанных с распознаванием объектов по соотношению точности к быстродействию. Изменение масштаба, искажения и смещения незначительно влияют на результаты работы сверточной нейронной сети.

Для обучения нейронной сети была выбрана открытая программная библиотека TensorFlow для языка программирования Python. Данная библиотека предназначена для автоматического нахождения и классификации образов. Из библиотеки Google Zoo использовали

модель обнаружения (pre-trained models of detection) с названием `ssd_resnet50_v1_fpn_640x640_coco17_tpu-8`. Данная модель обнаружения позволяет достигать отличной точности обнаружения объектов на изображениях, используя небольшой объем набора данных. Также данная модель оптимально подходит для исполнения на одноплатных компьютерах таких как NVIDIA Jetson Nano.

Для обучения нейронной сети использовался ноутбук с видеокартой NVIDIA GeForce RTX 3070 для ноутбуков 105 W с 8 гигабайтами видеопамяти.

В качестве автономной системы для работы нейронной сети может использоваться компьютер с модулем искусственного интеллекта серии NVIDIA Jetson / AGX (до 2048 CUDA ядер, 64 Tensor ядер, 64 гигабайта памяти), поддерживающий одновременную работу до 162 камер разрешением 720p с частотой 30 к/с. В собранной системе использовался одноплатный высокопроизводительный компьютер NVIDIA Jetson Nano (рисунок 4.2), оснащенный 128-CUDA ядрами с 4 гигабайтами памяти, возможна одновременная работа 18 камер разрешением 720p с частотой 30 к/с.

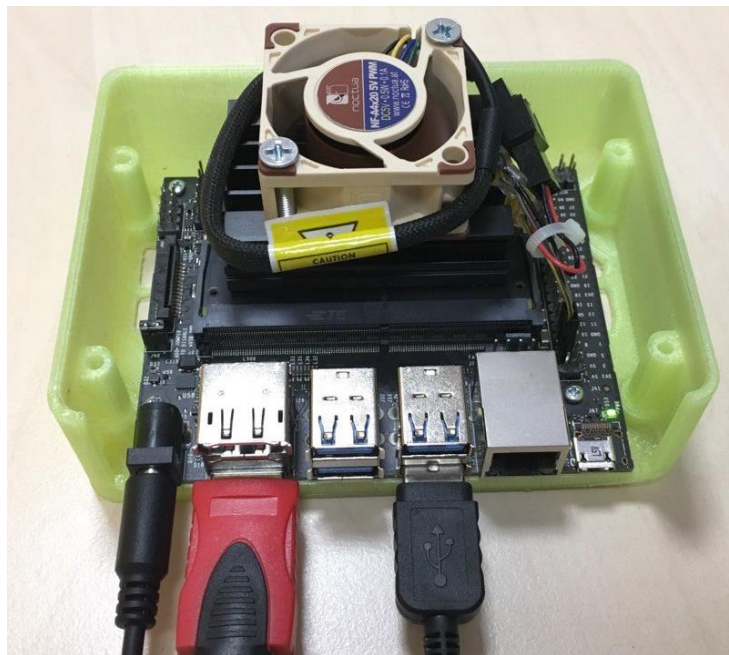


Рисунок 4.2 – Фотография NVIDIA Jetson Nano с подключенными устройствами

Источник: материалы автора

В таблице 4.3 приведено сравнение удельной стоимости обработки одного видеопотока 720p 30 к/с у компьютеров NVIDIA с различным модулем искусственного интеллекта Jetson.

Таблица 4.3 – Сравнение удельной стоимости обработки одного видеопотока 720p 30 к/с

Наименование устройства обработки видеопотока	Максимальное количество камер для обработки видеопотока 720p 30 к/с, шт.	Рекомендованная стоимость одноплатного компьютера, доллары США	Удельная стоимость обработки одного видеопотока 720p 30 к/с, долларов США
Jetson Nano Developer Kit 4Gb	18	99	5,50
Jetson Xavier NX Developer Kit 8Gb	49	399	8,14
Jetson AGX Xavier Developer Kit 32Gb	162	699	4,31
Jetson AGX Orin Developer Kit 32Gb	54	1999	37,00

4.5 Результаты обучения и оценка точности обученной нейронной сети

Примеры предобработанных изображений обученной нейронной сетью представлены на рисунке 4.3.

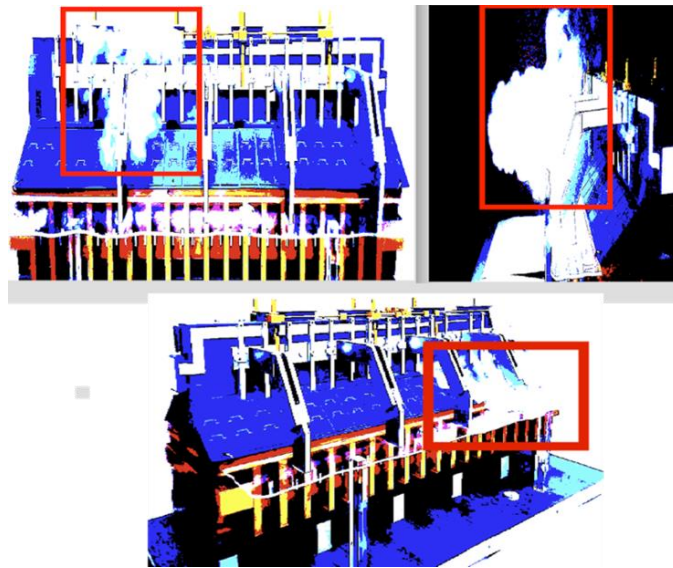


Рисунок 4.3 – Примеры выделения контура дыма на фотографиях масштабного макета электролизера с разных сторон (выделено красным прямоугольником)

Источник: материалы автора

Важнейшим функционалом разработанной системы является возможность определения номера электролизной ванны с нарушением системы сухой газоочистки. Для этого была выполнена калибровка системы технического зрения, задана функция, определяющая локацию каждой электролизной ванны, которая попадает в кадр. Пример распознавания видимых

выбросов на масштабных моделях электролизера в режиме реального времени представлен на рисунке 4.4.

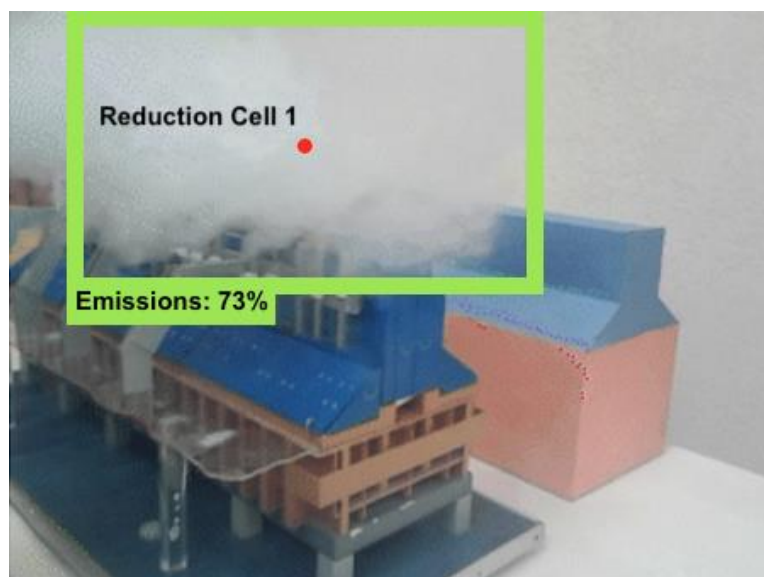


Рисунок 4.4 – Определение локации задымления (определение номера электролизера с нарушенной системой газоочистки) на масштабных моделях электролизера при помощи нейронной сети, исполняемой на NVIDIA Jetson Nano

Источник: материалы автора

Обученная нейронная сеть также была протестирована на наборе данных с электролизного цеха. На рисунке 4.5 представлен пример распознавания видимого выброса на фотографии электролизного цеха. Нейронная сеть успешно определяет задымление в производственных условиях.

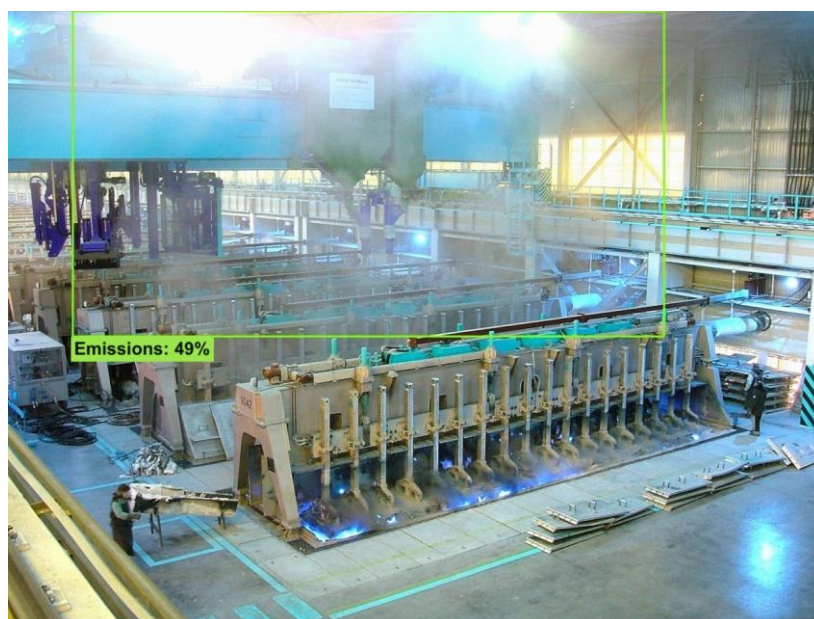


Рисунок 4.5 – Распознавание видимого выброса в реальном электролизном цехе при помощи нейронной сети, исполняемой на NVIDIA Jetson Nano

Источник: материалы автора

Для оценки качества обученной нейронной сети на вход модели подавался тестовый набор данных, который использовался для обучения нейронной сети.

На рисунке 4.6 представлены графики потерь при различных операциях с изображениями [98, 109].

Для вычисления функции потерь используется среднеквадратическая ошибка, формула (4.1):

$$E_i = \sum \frac{1}{2} \cdot (target_j - output_j)^2 \quad (4.1)$$

где *target* – это реальные значения;

output – предсказанные значения.

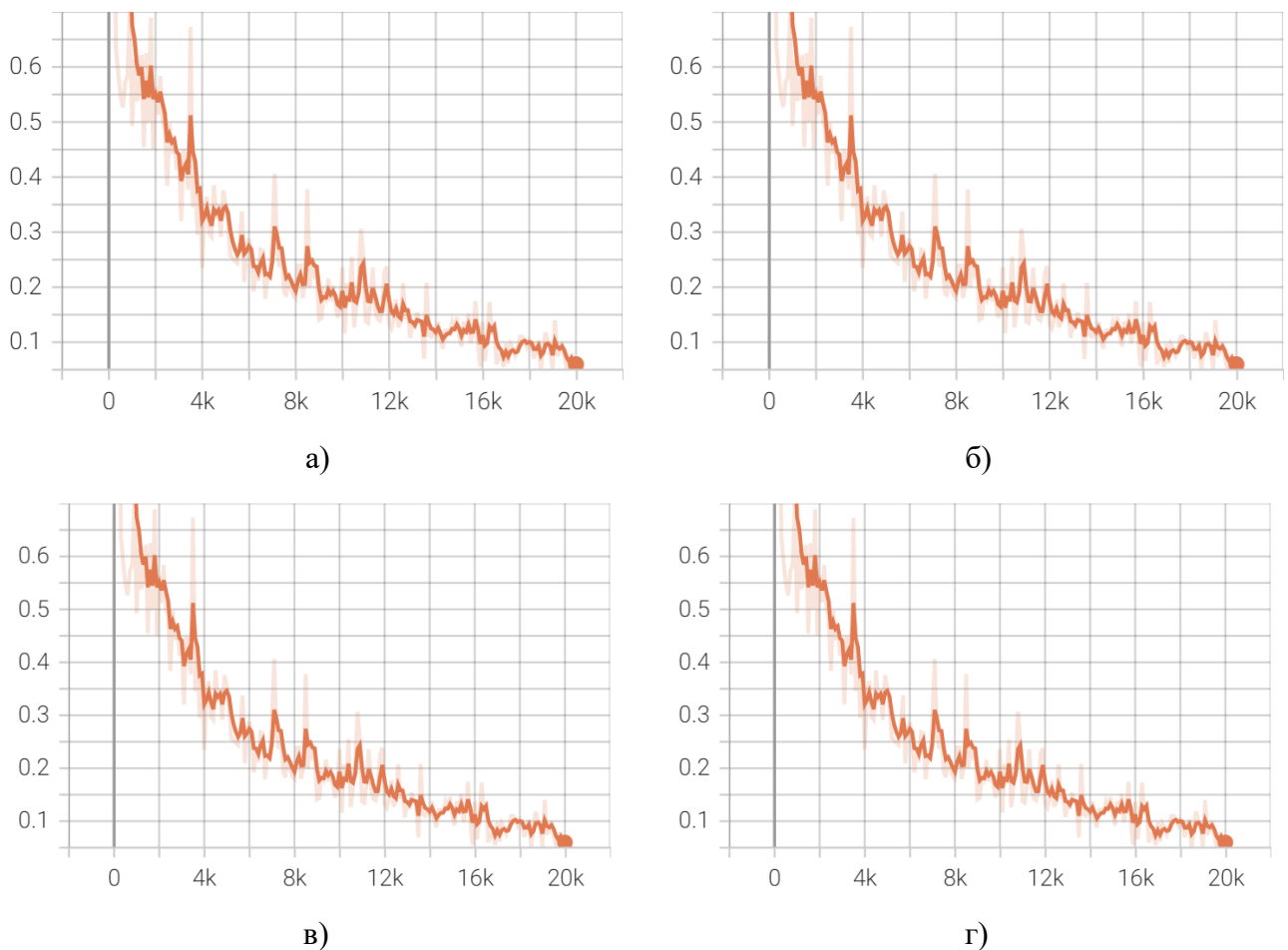


Рисунок 4.6 – Графики потерь во время обучения нейронной сети при различных операциях с изображениями: а) при классификации (classification loss); б) при локализации (localization loss); в) при регуляризации (regularization loss); г) график полных потерь.

Источник: материалы автора

Для обучения нейронной сети было задано 20000 итерации (training steps). На последнем шаге обучения потери (параметр «classification_loss») равны 0,061, следовательно нейронная сеть достаточно точно определяет наличие задымления на изображениях.

Функция полных потерь рассчитывается по формуле (4.2):

$$E_{total}(step) = E_{classification}(step) + E_{localization}(step) + E_{regularization}(step) \quad (4.2)$$

где $E_{classification}(step)$ – ошибка по классификации;

$E_{localization}(step)$ – ошибка по локализации;

$E_{regularization}(step)$ – ошибка по регуляризации.

4.6 Экономический эффект от разработки автоматической системы мониторинга видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха

Для расчета экономического эффекта необходимо произвести расчет количества требуемых широкоугольных промышленных камер на основе чертежей реального электролизного цеха. По результатам геометрического расчета (рисунок 4.7) определено, что одна широкоугольная камера 120° способна захватывать 5 электролизеров.

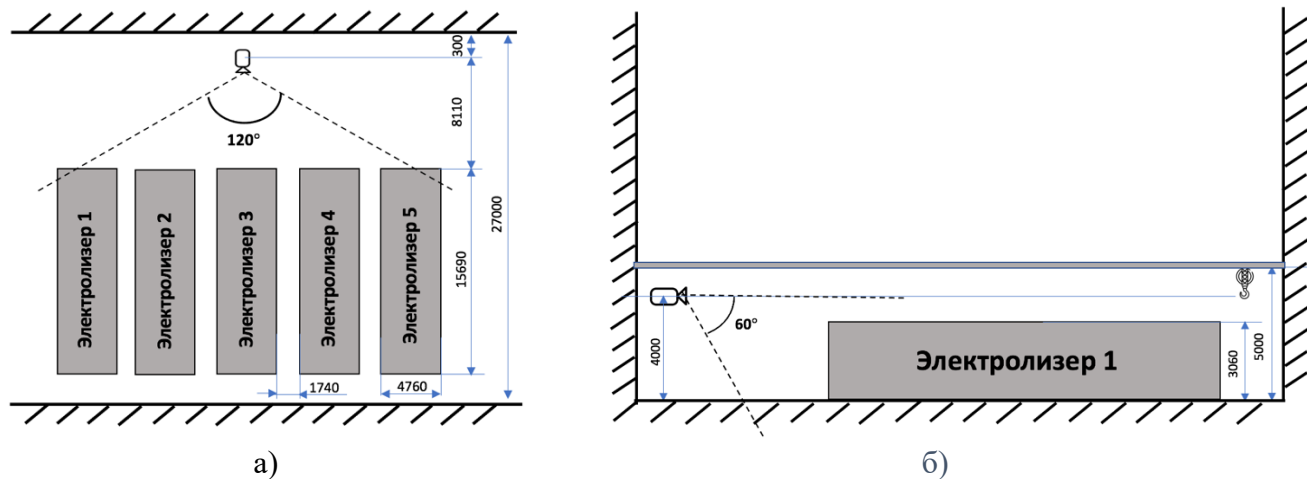


Рисунок 4.7 – Схема монтажа камеры на плане электролизного цеха

Хакасского алюминиевого завода: а) вид сверху; б) вид сбоку. Источник: материалы автора

Отечественный производитель первичного алюминия ОК РУСАЛ с 2018 года разрабатывает собственную систему мониторинга видимых выбросов вредных веществ в электролизном цехе, однако разработанная система рассчитана для электролизеров Содерберга и, согласно открытым источникам, планируется к внедрению в 2023 – 2024 г. на 6 корпусах Братского алюминиевого завода.

Стоимость реализации предлагаемой авторами системы технического зрения для обнаружения видимых выбросов вредных веществ в электролизном цехе алюминиевого завода на примере Хакасского алюминиевого завода с 336 электролизерами с обожженными анодами (ОА)², представлена в таблице 4.4.

² Официальный сайт компании ОК РУСАЛ. Информационная страница о Хакасском алюминиевом заводе <https://rusal.ru/innovation/development/khaz/>

Таблица 4.4 – Стоимость реализации разработанной автоматической системы мониторинга на примере Хакасского алюминиевого завода

Название оборудования	Стоимость за 1 шт, долларов США	Требуемое кол-во, шт	Стоимость оборудования, долларов США	Общая стоимость оборудования, долларов США	Стоимость разработки системы, монтажных работ и сопутствующие расходы, долларов США	Итого, общая стоимость разработанной системы, долларов США
Защищенная камера с углом обзора 120°	1 000	68	68 000	75 650	30 000	105 650
Одноплатный компьютер NVIDIA Jetson Nano 4gb в защищенном исполнении (сист.охлаждения, корпус, sd карта), позволяющий обрабатывать до 18 видеопотоков 720p	300	4 + 2 резервных	1 800			
Коммутатор на 24 входа	250	4 + 1 общий	1 250			
Файловый сервер	2 000	1 + 1 резервный	4 000			
Экранированная витая пара CAT6 (с максимальной скоростью передачи до 1 Гбит/с)	0,15	4000	600			

Предлагаемая система построена на базе распределенной архитектуры сети и таким образом обладает преимуществом перед клиент-серверной архитектурой, используемой в системе мониторинга ОК РУСАЛ – обладает лучшей надежностью и отказоустойчивостью (нерезервируемым элементом является только центральный коммутатор), предназначена для более мощных и современных электролизеров с ОА, не уступает по общей точности, дешевле в реализации чем аналоги на базе клиент-серверной архитектуры, а также повышает оперативность обнаружения видимых выбросов, нарушений сплошности (целостности) криолито-глиноземной корки по сравнению с визуальным наблюдением (рабочим персоналом) минимум в 2 раза, что позволяет своевременно восстановить укрытие электролизера.

4.7 Аналоги разработанной системы

Актуальность разработки системы подтверждается интересом со стороны алюминиевых компаний. С 2019 года подобную систему видеомониторинга загрязняющих выбросов разрабатывает российская алюминиевая компания ОК РУСАЛ. В настоящее время система проходит испытания на Красноярском алюминиевом заводе. К 2023 – 2024 году планируется внедрение системы видеомониторинга выбросов на Братском алюминиевом заводе. Система отличается клиент – серверной архитектурой сети (рисунок 4.8), тогда как описываемая в статье система имеет распределенную архитектуру (рисунок 4.9). Недостатком клиент-серверной архитектуры является наличие узкого места между сервером и большим числом нерезервируемых компонентов. Подобные системы имеют ограничения при обслуживании системы и для их обслуживания требуется большие временные затраты. К преимуществам распределенной архитектуры сети относится повышение отказоустойчивости системы через сегментирование сети и подключение резервных одноплатных компьютеров NVIDIA Jetson (5 % от общего числа устройств в сети), возможность размещения резервного сервера для хранения лог – файлов и генерации отчетов.

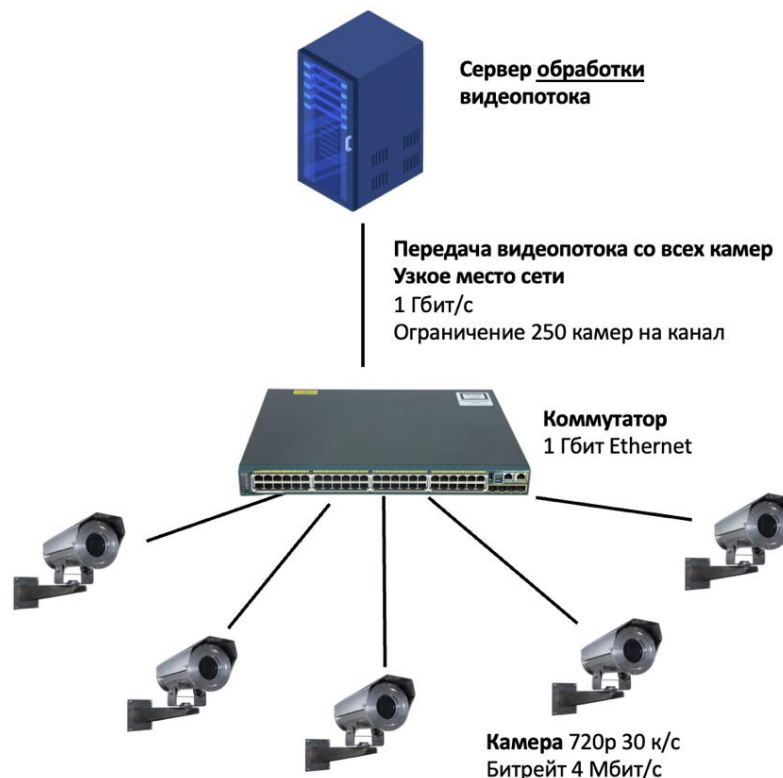


Рисунок 4.8 – Клиент – серверная архитектура системы обработки информации (тонкий клиент), используемая в автоматической системе мониторинга видимых выбросов ОК РУСАЛ

Источник: разработано автором.

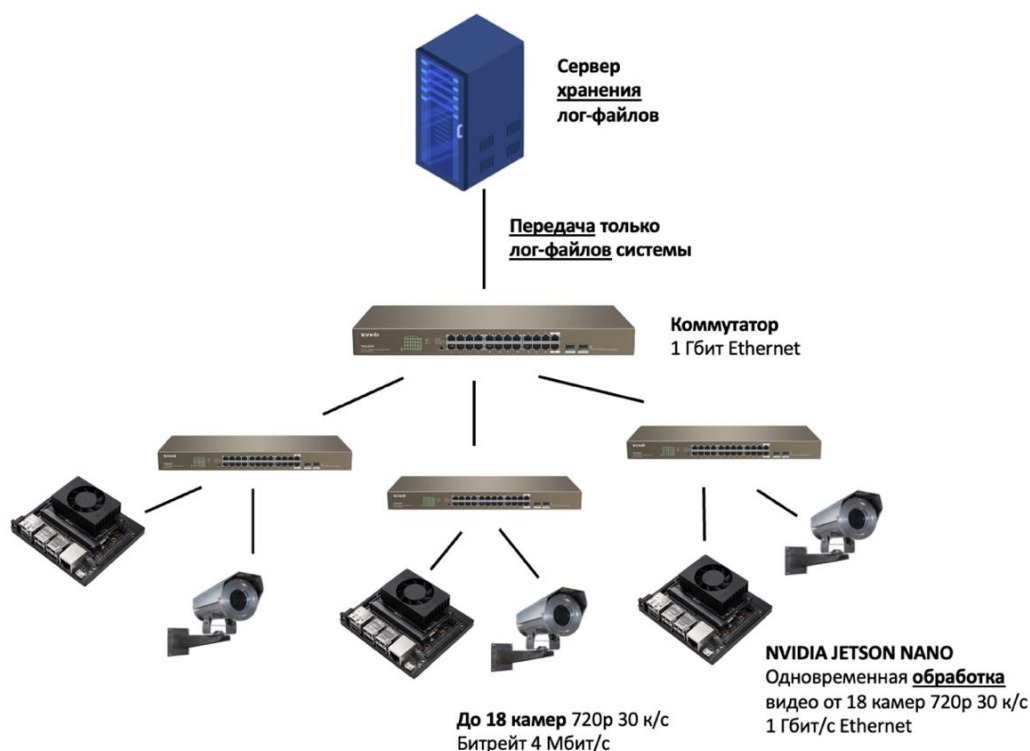


Рисунок 4.9 – Распределенная архитектура сети разработанной автоматической системы мониторинга видимых выбросов на примере NVIDIA Jetson

Источник: разработано автором.

Обобщенная структурная схема системы мониторинга электролизера с использованием многофункционального пробойного устройства и системы технического зрения для определения видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха представлена на рисунке 4.10.



Рисунок 4.10 – Структурная схема системы мониторинга электролизера

Источник: разработано автором.

В левой части схемы показана распределенная архитектура сети, разработанной автоматической системы мониторинга видимых выбросов на примере одноплатного компьютера NVIDIA Jetson Nano 4gb. Один одноплатный компьютер способен одновременно обрабатывать до 18 видеопотоков с разрешением 720p и частотой 30 к/с (битрейт видео 4 Мбит/с). Для подключения используется гигабитный Ethernet кабель. В правой части отображены используемые датчики, исполнительные устройства, ПЛК и микроконтроллер, а также протоколы передачи данных.

4.8 Выводы по Главе 4

Обученная нейронная сеть обладает точностью: по классификации 96%, по локализации 98,7% и имеет общую точность, вычисленную как произведение предыдущих 94,752%, что подтверждает адекватность возможности ее использования для обнаружения видимых выбросов загрязняющих веществ в электролизном цехе. Точность разработанной автоматической системы мониторинга выбросов ОК РУСАЛ, согласно научным публикациям, составляет 95 %. Таким образом, разработанная система имеет сопоставимую точность нейронной сети при меньшей стоимости исполнительных устройств благодаря использованию компьютеров NVIDIA Jetson, а также лучшую архитектуру сети.

Разработанная система обладает преимуществом перед системами обнаружения выбросов на основе датчиков газа. Из-за большой площади электролизного цеха концентрация загрязняющих веществ в зоне рядом с электролизером растет медленно, а облако с загрязняющими веществами распространяется в пространстве неравномерно. По этой причине интервал времени между выбросом и срабатыванием датчика значительно увеличивается. Предложенная система технического зрения на основе нейронной сети позволяет повысить скорость обнаружения видимых выбросов загрязняющих веществ в электролизном цехе минимум в 2 раза. Однако имеются и недостатки: система нечувствительна к небольшим выбросам. Поэтому наилучший результат достигается при совокупном использовании системы технического зрения и датчиков газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи – повышение эффективности управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава за счет снижения числа анодных эффектов на основе разработки и использования технических и программных решений для системы АПГ.

По результатам выполнения диссертационной работы достигнуты следующие результаты:

1. На основе анализа существующих технических решений в области управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава выявлены актуальные проблемы управления содержанием глинозема в электролите. Для снижения числа анодных эффектов целесообразно контролировать разрушение криолито-глиноземной корки, определять уровень электролита, а также производить анализ низкочастотных шумов напряжения на электролизере.

2. Для контроля уровня электролита в автоматическом режиме без локальной разгерметизации створчатых укрытий электролизера предложен способ и разработана конструкция пневмоцилиндра АПГ со встроенным в «мертвый» объем цилиндра оптическим датчиком, в конструкцию электролизера добавлена измерительная электрическая цепь постоянного тока, один контакт которой подключен на электрически изолированный пробойник АПГ, а второй контакт – к блюмсу электролизера. Данное решение позволяет регистрировать момент касания электролита наконечником пробойника и определять уровень расплава в электролизной ванне. Выполнена оценка погрешности метода измерения.

3. Проведен анализ низкочастотных шумов напряжения электролизера методом быстрого преобразования Фурье, определены преобладающие частоты в диапазоне 0 – 1 Гц и их амплитуды, соответствующие содержанию глинозема от 0 до 3,5 %. На основании косвенных значений текущего содержания глинозема и определенном уровне электролита производится расчет дозы глинозема.

4. Разработана система мониторинга с использованием технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов в электролизном цехе. В рамках предложенной системы выполнены сбор и разметка изображений макета алюминиевого электролизера с наблюдаемыми выбросами, обучена нейронная сеть, подтверждена точность системы технического зрения. Разработаны схема установки системы технического зрения в электролизном цехе и архитектура системы обработки информации.

Перспективным направлением для дальнейших исследований является создание автоматической системы управления для электролизера с вертикально расположенными электродами.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АПП – система автоматической подачи глинозема;
- АПФ – система автоматического питания фторосолями;
- АСУ – автоматизированные системы управления;
- АСУ ТП – автоматизированные системы управления технологическими процессами;
- АЭ – анодные эффекты;
- БТ – электролизеры с боковым токоподводом;
- БПФ – быстрое преобразование Фурье;
- ВТ – электролизеры с верхним токоподводом;
- КО – криолитовое отношение;
- КГР – криолито-глиноземный расплав;
- МГД-нестабильность – магнитогидродинамическая нестабильность;
- МПП – межполюсное расстояние;
- ОА – электролизер с обожжёнными анодами;
- ПЛК – программируемый логический контроллер;
- ПФУ – перфторуглероды;
- СОА – электролизер с самообжигающимися анодами Содерберга;
- ЦРГ – система централизованной раздачи глинозема;
- PFPB (Point Feed Prebake) – технология электролиза с использованием обожжённых анодов и точечных питателей;
- SWPB (Centre Worked Prebake) – технология электролиза с использованием обожжённых анодов и центральной балки подачи тока;
- SWPB (Side Worked Prebake) – технология электролиза с использованием обожжённых анодов и периферийной обработки электролизёров;
- VSS (Vertical Stud Soderberg) – технология электролиза с использованием самообжигающихся анодов Содерберга с верхним токоподводом;
- HSS (Horizontal Stud Soderberg) технология электролиза с использованием самообжигающихся анодов Содерберга с боковым токоподводом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бажин, В.Ю. Обоснование ресурсосбережения в технологии производства алюминия в высокоамперных электролизерах с обожженными анодами: специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бажин Владимир Юрьевич; Санкт-Петербургский государственный горный университет. – Санкт-Петербург, 2012. – 327 с. – Текст : непосредственный.
2. Баймаков, Ю.В. Электролиз расплавленных солей: учеб. пособие для металлург. специальностей / Ю.В. Баймаков, М.М. Ветюков. – Москва : Metallurgiya, 1966. – 560 с. – Текст : непосредственный.
3. Басов, А.И. Справочник механика заводов цветной металлургии / А.И. Басов, Ф.П. Ельцев. – Москва : Metallurgiya, 1981. – 496 с. – Текст : непосредственный.
4. Богучанский алюминиевый завод. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ: [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/development/bemo/> (дата обращения: 30.04.2023).
5. Борисоглебский, Ю.В. Вклад «политехников» в создание и развитие алюминиевой промышленности / Ю.В. Борисоглебский; под общей редакцией Н.А. Калужского // Труды ВАМИ. – СПб : Всесоюз. н.-и. и проект. ин-т алюминиевой, магниевой и электрод. пром-сти. ВАМИ, 2001. – С. 74 – 79. – Текст : непосредственный.
6. Борисоглебский, Ю.В. Металлургия алюминия / Ю.В. Борисоглебский, Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин [и др.]. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. – 438 с. – Текст : непосредственный.
7. Васюнина, Н.В. Влияние гранулометрического состава криолитоглиноземной шихты на формирование корки алюминиевого электролизера / Н.В. Васюнина, Н.А. Шарыпов, С.К. Жедь, И.П. Васюнина. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2019. – № 2. – С. 45 – 50. DOI: 10.17580/tsm.2019.02.07.
8. Ветюков, М.М. Электрометаллургия алюминия и магния: Учебник для вузов / М.М. Ветюков, А.М. Цыплаков, С.Н. Школьников. – Москва : Metallurgiya, 1987. – 320 с. – Текст : непосредственный.
9. Виктор Манн, РУСАЛ: «Революционные технологии стали реальностью». – Текст : электронный // Управление производством: [сайт]. – URL: https://up-pro.ru/library/modernization/modernization_technology_upgrade/mann-realnost/ (дата обращения: 30.04.2023).
10. Вольфсон, Г.Е. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами / Г.Е. Вольфсон, В.П. Ланкин – Москва: Metallurgiya, 1974 – 136 с. – Текст : непосредственный.

11. Всероссийский Аллюминиево-магниевый Институт. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/research-centres/vami/> (дата обращения: 15.05.2023).
12. Галевский, Г.В. Металлургия алюминия: стабилизация и модуляция тока электролизной серии : монография / Г.В. Галевский, М.Я. Минцис, Г.А. Сиразутдинов. – Новокузнецк : СибГИУ, 2011. – 151 с. – Текст : непосредственный.
13. Галевский, Г.В. Металлургия алюминия. Технология, электроснабжение, автоматизация / Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин, М.Я. Минцис, Г.А. Сиразутдинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Флинта: Наука, 2008. – 529 с. – Текст : непосредственный.
14. Галевский, Г.В. Оборудование и технология алюминиевого производства / Г.В. Галевский, М.Я. Минцис, В.В. Руднева. – 2-е издание. – Москва : Флинта, 2017. – 252 с. – Текст : непосредственный.
15. Годовые отчеты компании ОК РУСАЛ// Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://www.rusal.ru/investors/financial-stat/annual-reports/> (дата обращения: 10.05.2023). – Текст : электронный.
16. Горланов Е.С. История алюминия : начало : монография / Е.С. Горланов. – Санкт-Петербург : Политех–Пресс : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – 325 с. – Текст : непосредственный.
17. Горланов, Е.С. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 1. Традиционные направления развития / Е.С. Горланов, В.Н. Бричкин, А.А. Поляков // Цветные металлы. – 2020. – № 2. – С. 36 – 41. DOI: 10.17580/tsm.2020.02.04 – Текст : непосредственный.
18. Горланов, Е.С. Электролитическое производство алюминия. Обзор. Часть 2. Перспективные направления развития / Е.С. Горланов, Р. Кавалла, А.А. Поляков // Цветные металлы. – 2020. – № 10. – С. 42 – 49. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.06 – Текст : непосредственный.
19. Громов, Б.С. Производство алюминия в электролизерах с обожженными анодами / Б.С. Громов, Р.В. Пак, В.В. Веселков, А.Е. Черных, Б.И. Зельберг – Санкт-Петербург: МАНЭБ, 2002. – 220 с. – Текст : непосредственный.
20. Деркач, А.С. Автоматическое управление процессом электролиза алюминия / А.С. Деркач, В.И. Штерн ; под общей редакцией В.М. Гуськова // Труды ВАМИ №52. — Ленинград : Всесоюз. н.-и. и проект. ин-т алюминиевой, магниевой и электрод. пром-сти. ВАМИ, 1964. — С. 81 – 88. — Текст : непосредственный.
21. Деркач, А.С. Разработка и внедрение автоматизированных систем типа «Алюминий» для управления сериями алюминиевых электролизеров / А.С. Деркач, Н.А. Калужский, Г.В. Форсблом [и др.]. – Ленинград : М-во цв. металлургии СССР. Главалюминий. Всесоюз. науч.-исслед. и проектный ин-т алюминиевой, магниевой и электродной пром-сти. ВАМИ. Главэнерго.

Всесоюз. науч.-исслед. и конструкт. ин-т «Цветметавтоматика». ВНИКИ ЦМА, 1972. – 30 с. – Текст : непосредственный.

22. Деркач, А.С. Разработка и исследование методов и устройств для централизованного контроля алюминиевых электролизеров: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Всесоюз. науч.-исслед. и проектный ин-т алюминиевой, магниевой и электродной пром-сти. - Ленинград, 1967. – 19 с. – Текст : непосредственный.

23. Зарождение алюминиевой отрасли. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/about/facts/> (дата обращения: 30.04.2023).

24. Заявка на патент РФ № 2023109899/05 Устройство для пробивки криолитоглиноземной корки алюминиевого электролизера; заявл. 19.04.2023 / **Шестаков А.К.**, Петров П.А., Николаев М.Ю. Заявитель СПГУ.

25. ИркаЗ 5 серия. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/development/5-irkaz/> (дата обращения: 30.04.2023).

26. Исаева, Л.А. Динамика образования и свойства криолитоглиноземных корок / Л.А. Исаева, Ю.Г. Михалев, Н.Ю. Жаринова. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2020. – № 8. – С. 56 – 61. DOI: 10.17580/tsm.2020.08.07.

27. Калужский, Н.А. ВАМИ и его роль в становлении и развитии металлургии легких металлов / Н.А. Калужский, В.П. Ланкин, В.И. Щеголев. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2001. – № 8. – С. 63 – 72.

28. Калужский, Н.А. Научная и проектная база становления и развития отечественной металлургии легких металлов / Н.А. Калужский, В.И. Щеголев. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2003. – № 7. – С. 13 – 23.

29. Калужский, Н.А. Отечественная металлургия алюминия - от первых шагов до промышленного производства / Н.А. Калужский, А.Ю. Тайц. – Москва : Металлургия, 1991. – 110 с. – Текст : непосредственный.

30. Машовец, В.П. Электролитическое производство алюминия / В.П. Машовец, Г.В. Форсблом – Москва: Metallurgizdat, 1951 — 185 с. – Текст : непосредственный.

31. Меликянц, Р.В. Автоматизация алюминиевых электролизеров. Часть I. Автоматический контроль алюминиевых электролизеров / Р.В. Меликянц, Б.В. Рабинович. – Москва : Цветметинформация. М-во цвет. металлургии СССР. ЦНИИ информации и техн.-экон. исследований цвет. металлургии, 1976. – 56 с. – Текст : непосредственный.

32. Меликянц, Р.В. Автоматизированные системы обслуживания алюминиевых электролизеров / Р.В. Меликянц, Э.Т. Мироненко, Е.И. Штеренберг, З.З. Явно // Комплексная автоматизация и автоматизированные системы управления в цветной металлургии. Обзорная

информация. – Москва : М-во цв. Metallургии СССР. ЦНИИцветмет экономики и информации, 1987. – № 5 – С. 45. – Текст : непосредственный.

33. Меликянц, Р.В. Опыт внедрения систем автоматического контроля и управления типа «Алюминий» / Р.В. Меликянц, В.И. Штерн. – Москва : М-во цв. металлургии СССР. Центр. науч.-исслед. ин-т информации и техн.-экон. исследований цв. металлургии, 1971. – 99 с. – Текст : непосредственный.

34. Минцис, М.Я. Исследование серии алюминиевых электролизеров как объекта контроля и управления : специальность 05.16.03 «Металлургия цветных, благородных и редких металлов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Минцис Моисей Яковлевич; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т алюминиевой, магниевой и электродной пром.-сти. ВАМИ. – Ленинград, 1973. – 19 с. – Текст : непосредственный.

35. Николаев, А.Ю. Расчет цеха электролитического получения алюминия / А.Ю. Николаев, А.В. Суздальцев – Екатеринбург: УрФУ, 2015 – 46 с. – Текст : непосредственный.

36. О компании. Основные факты. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/about/> (дата обращения: 14.05.2023).

37. Официальный сайт компании ТокСофт. АСУТП электролиза алюминия «ТРОЛЛЬ»: описание функций и структуры АСУТП – URL: <https://toxsoft.ru/vnedrenia/systema-upravleniya-electrolizom-aluminiya-troll/> (дата обращения: 04.05.2022). – Текст : электронный.

38. Официальный сайт компании Pronix. АСУТП электролиза алюминия «Электра»: Структура и состав. – Екатеринбург. – URL: <https://web.archive.org/web/20050205184525/http://pronix.e-burg.ru/syst.html> (дата обращения: 04.08.2022). – Текст : электронный.

39. Официальный сайт компании Pronix. АСУТП электролиза алюминия «Электра»: Технические характеристики. – Екатеринбург. – URL: <https://web.archive.org/web/20050205190028/http://pronix.e-burg.ru/systems.html> (дата обращения: 04.08.2022). – Текст : электронный.

40. Панов, Е.Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов, Г.Н. Васильченко, С.В. Даниленко, А.Я. Карвацкий, И.Л. Шилович, М.Ф. Боженко; Под общ. ред. Б.С. Громова. – Москва : Руда и металлы, 1998. – 256 с. – Текст : непосредственный.

41. Парижское соглашение о климате, 2015 год // Официальный сайт ООН : [сайт]. – URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата обращения: 12.05.2023). – Текст : электронный.

42. Патент № 175711, Франция. Procédé électrolytique pour la préparation de l'aluminium : заявл. 23.04.1886 : опубл. 01.09.1886 / Héroult P. L. T – Текст : непосредственный.

43. Патент № 400664, США. Process of reducing aluminium from its fluoride salts by electrolysis : № 207601 : заявл. 09.07.1886 : опубл. 02.04.1889 / CHARLES M. HALL – 3 с. : ил. – Текст : непосредственный.

44. Патент № 2023058 Российская Федерация, МПК C25C 3/20, 7/06. Способ управления процессом электролитического получения алюминия в электролизере : № 4881452/02 : заявл. 12.11.1990 : опубл. 15.11.1994 / Берх В.И., Казаков Д.Р., Калужский Н.А., Локшин Р.Г., Фитерман М.Я. ; Патентообладатель : Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности. – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

45. Патент № 2156834 Российская Федерация, МПК C25C 3/20 (2000.01). Распределенная автоматизированная система управления электролизом алюминия : № 99125525/02 : заявл. 06.12.1999 : опубл. 27.09.2000 / Магрычев А.Д., Тарабукин В.И., Копытов Ю.Н. – 1 с. : 8 ил. – Текст : непосредственный.

46. Патент № 2593560 Российская Федерация, МПК C25C 3/20 (2006.01). Способ управления алюминиевым электролизером по минимальной мощности : № 2015110596/02 : заявл. 25.03.2015 : опубл. 10.08.2016 / Борзых С. Д. ; Патентообладатель : Общество с ограниченной ответственностью «Логическое управление алюминиевым электролизером». – 13 с. : ил. – Текст : непосредственный.

47. Пискажова, Т.В. Управление тепловым балансом алюминиевых электролизеров / Т.В. Пискажова, Е.Р. Шайдулин, Т.В. Донцова, Ю.О. Авдеев // Цветные металлы. – 2019. – № 9. – С. 50–55. – DOI: 10.17580/tsm.2019.09.08. – Текст : непосредственный.

48. ПО HNCelVolt PE Software & Consulting // Software for Aluminum Smelting: [сайт]. – URL: <http://peter-entner.com/> (дата обращения: 03.05.2023). – Текст : электронный.

49. Поляков, А.А. Распределение тока и потенциала по поверхности вертикальных электродов при электролитическом получении алюминия : специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Поляков Андрей Александрович ; Санкт-Петербургский горный университет. – Санкт-Петербург, 2022. – 133 с. – Текст : непосредственный.

50. Поляков, П.В. Жизнь алюминиевого электролизера как диссипативной системы : монография / П.В. Поляков. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2018. – 190 с. – Текст : непосредственный.

51. Поляков, П.В. Математическое моделирование распределения тока при наличии нарушений на подошве анода алюминиевого электролизера / П.В. Поляков, Н.А. Шарыпов, В.А. Осипова, А.А. Пьяных // Цветные металлы. – 2019. – № 1. – DOI: 10.17580/tsm.2019.01.04. – Текст : непосредственный.

52. Проекты ВАМИ: Алюминиевые заводы. – Текст : электронный // Официальный сайт РУСАЛ ВАМИ : [сайт]. – URL: <https://vami.ru/proekty/alyuminievye-zavody.html> (дата обращения: 15.05.2023).

53. Протокол общественных слушаний объекта государственной экологической экспертизы: «Красноярский алюминиевый завод. Экологическая реконструкция», включая предварительные материалы оценки воздействия на окружающую среду. – Текст : электронный // Официальный сайт администрации г. Красноярск : [сайт]. – URL: https://www.admkrsk.ru/citytoday/ecology/SiteAssets/Pages/inform/Протокол%20слушаний_КРАЗ_15.04.2022.pdf (дата обращения: 30.04.2023).

54. РА-400. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/technology/ra-400/> (дата обращения: 30.04.2023).

55. РА-550. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/technology/ra-550/> (дата обращения: 30.04.2023).

56. Рабинович, Б.В. Исследование и разработка структур автоматизированных систем управления процессом электролиза алюминия: специальность 198 «Автоматизация производственных процессов в области цветной металлургии»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рабинович Борис Вениаминович ; Моск. ин-т стали и сплавов. – Москва, 1971. – 28 с. – Текст : непосредственный.

57. Сибирский научно-исследовательский, конструкторский и проектный институт алюминиевой и электродной промышленности. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/research-centres/sibvami/> (дата обращения: 15.05.2023).

58. Сизяков, В.М. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России / В.М. Сизяков, П.В. Поляков, В.Ю. Бажин // Цветные металлы. – 2022. – № 7. – С. 16 – 23. – Текст : непосредственный.

59. Спири́н, Н.А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спири́н, 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. Электронный научный архив УрФУ, URL: <http://hdl.handle.net/10995/27839>; (дата обращения: 16.03.2023). – Текст : электронный.

60. Тайшетский алюминиевый завод. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/development/TaAZ/> (дата обращения: 30.04.2023).

61. Терентьев, В.Г., Производство алюминия / В.Г. Терентьев, Р.М. Школьников, И.С. Гринберг – Изд. перераб.. – Новокузнецк: Сиб. науч.-исслед., конструкт. и проект. ин-т алюминиевой и электрод. пром-сти (ОАО Сиб ВАМИ), 2000 – 338 с. – Текст : непосредственный.

62. Технический директор РУСАЛа: Манн: «У РУСАЛа есть хорошие возможности для качественного скачка в технологии инертного анода». – Текст : электронный // Официальный сайт Алюминиевой Ассоциации (Объединение производителей, поставщиков и потребителей алюминия) : [сайт]. – URL: https://www.aluminas.ru/media/interview/tekhnicheskii_direktor_rusala_mann_u_rusala_est_khoroshee_vozmozhnosti_dlya_kachestvennogo_skachka_v/ (дата обращения: 30.04.2023).

63. Федорин, П.В. История и люди первенца алюминиевой промышленности России / П.В. Федорин. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2007. – № 8. – С. 60 – 63.

64. Хакасский алюминиевый завод. – Текст : электронный // Официальный сайт ОК РУСАЛ : [сайт]. – URL: <https://rusal.ru/innovation/development/khaz/> (дата обращения: 30.04.2023).

65. Чжен, В.А. РУСАЛ ВАМИ в промышленности легких металлов (к 85-летию образования института) / В.А. Чжен, В.П. Параска. – Санкт-Петербург : Коста, 2014. – 272 с. – Текст : непосредственный.

66. Шарипов, Д.Д. Стабилизация технологических параметров в условиях кислых электролитов для мощных алюминиевых электролизеров : специальность 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» : Диссертация на соискание кандидата технических наук / Шарипов, Д.Д. ; ФГБОУ ВПО «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – Санкт-Петербург, 2013. – 123 с.

67. Шахрай, С.Г. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера / С.Г. Шахрай, А.П. Скуратов, В.В. Кондратьев, В.А. Ершов // Цветные металлы. – 2016. – № 2. – С. 52–56. – DOI: 10.17580/tsm.2016.02.08. – Текст : непосредственный.

68. **Шестаков, А.К.** Состояние производства первичного алюминия на начало 2020 г. / А.К. Шестаков, Р.М. Садыков, П.А. Петров. – Текст : непосредственный // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 7 (97). – С. 114 – 119. DOI: 10.23670/IRJ.2020.97.7.017.

69. Штерн В.И. Разработка алгоритмов управления технологическим режимом алюминиевых электролизеров : Автореферат дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук / Всесоюз. науч.-исслед. и проект. ин-т алюминиевой, магниевой и электродной пром-сти. – Ленинград, 1967. – 19 с. – Текст : непосредственный.

70. Юшкова, О.В. Влияние механической активации на индекс пыления и скорость растворения глинозема в расплаве криолита / О.В. Юшкова, Л.А. Исаева, П.В. Поляков, Е.Г.

Аввакумов. – Текст : непосредственный // Цветные металлы. – 2018. – № 8. – С. 63 – 68. DOI: 10.17580/tsm.2018.08.08.

71. Aluminum decarbonization at a cost that makes sense // Официальный сайт международной консалтинговой компании McKinsey & Company: [сайт]. — URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/aluminum-decarbonization-at-a-cost-that-makes-sense#/> (дата обращения: 21.04.2023). – Текст : электронный.

72. Aluminum Industry Worldwide – Statistics & Facts // Официальный сайт аналитического агентства Statista: [сайт]. – URL: <https://www.statista.com/topics/2072/aluminum/#topicOverview> (дата обращения: 16.05.2023). – Текст : электронный.

73. Aluminum market // Официальный сайт аналитического агентства Emergen Research: [сайт]. – URL: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/aluminum-market> (дата обращения: 16.05.2023). – Текст : электронный.

74. Annual report // Официальный сайт компании China Hongqiao Group Limited: [сайт]. – URL: http://en.hongqiaochina.com/Investors_report.html (дата обращения: 16.05.2023). – Текст : электронный.

75. Bearne G. Reduction line process control development // Proceedings 6th Austr. Al Smelting Workshop. – 1998. – С. 91-130 – Текст : непосредственный.

76. Bertilorenzi, M. From patents to industry. Paul Héroult and international patents strategies // Cahiers d'histoire de l'aluminium. – 2012. – №Т. 49. – №. 2. – С. 46 – 69. DOI: 10.3917/cha.049.0046.

77. Bonny P. et al. Process and apparatus for accurately controlling the rate of introduction and the content of alumina in an igneous electrolysis tank in the production of aluminium: пат. 4431491 США. – 1984 – Текст : непосредственный.

78. Cui, J. Multipoint feeding strategy of aluminum reduction cell based on distributed subspace predictive control / J. Cui, P. Wang, X. Li, R. Huang, Q. Li, B. Cao, H. Lu // Machines. – 2022. – Vol. 10, № 3. – Article 220. – DOI: 10.3390/machines10030220. – Текст : непосредственный.

79. Dupuis M. How to limit the heat loss of anode stubs and cathode collector bars in order to reduce cell energy consumption/ M. Dupuis // Light Metals 2019 : Minerals, Metals and Materials Series. – Cham : Springer, 2019. – P. 521–531. – DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_67. – Текст : непосредственный.

80. Dupuis, M. Very low energy consumption cell designs: the cell heat balance challenge / M. Dupuis // Light Metals 2018 : Minerals, Metals and Materials Series. – Cham : Springer, 2018. – P. 689–697. – DOI: 10.1007/978-3-319-72284-9_89. – Текст : непосредственный.

81. Dupuis, M. Welch B. Designing cells for the future – wider and/or even higher amperage? / M. Dupuis // Aluminium. – 2017. – Vol. 93, № 1–2. – P. 45–49. – Текст : непосредственный.

82. Fardeau S. Statistical Evaluation and Modeling of the Link between Anode Effects and Bath Height, and Implications for the ALPSYS Pot Control System / S. Fardeau, A. Martel, P. Marcellin, P. Richard // *Light Metals*. – 2014. – P. 845–850. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48144-9_142 – Текст : непосредственный.

83. Gorlanov E.S. On the question of using solid electrodes in the electrolysis of cryolite – alumina melts. Part 3. Electric field distribution on the electrodes / Gorlanov E.S., Polyakov A.A. // *iPolytech Journal*. – 2021. – № Том 25, №2. – С. 235 – 251. – Текст : непосредственный.

84. Grjotheim, K. Aluminium electrolysis: Fundamentals of the Hall-Héroult process / K. Grjotheim, C. Krohn, M. Malinovsky, K. Matiasovsky. – 2nd edition. – Dusseldorf : Aluminium-Verlag, 1982. – 443 с. – Текст : непосредственный.

85. Gupta, A. Investigation of cathode and collector bar modification on thermal balance of a low amperage cell / A. Gupta, S. Modak, M. Sahoo, J. Janardhanan // *Light Metals 2015*. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015. – P. 747–752. – DOI: 10.1002/9781119093435.ch126. – Текст : непосредственный.

86. Haupin, W. Interpreting the Components of Cell Voltage / W. Haupin // *Essential Readings in Light Metals 2016* : Springer, Cham, 2016. – P. 153–159. – DOI:10.1007/978-3-319-48156-2_21. – Текст : непосредственный.

87. Jie, L. Experiments on measurement of online anode currents at anode beam in aluminum reduction cells / L. Jie, Y. Shuai, Z. Zhong, Z. Hongliang // *Light Metals 2015 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015. – P. 741–745. – DOI: 10.1007/978-3-319-48248-4_125. – Текст : непосредственный.

88. Jie, L. Experiments on measurement of online anode currents at anode beam in aluminum reduction cells / L. Jie, Y. Shuai, Z. Zhong, Z. Hongliang // *Light Metals 2015 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015. – P. 741–745. – DOI: 10.1007/978-3-319-48248-4_125. – Текст : непосредственный.

89. Johansen, S.T. A pragmatic model for alumina feeding / S.T. Johansen, K.E. Einarsrud, A. Solheim, K.J. Vachaparambil // *Light Metals 2022 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022. – P. 503–511. – DOI: 10.1007/978-3-030-92529-1_58. – Текст : непосредственный.

90. Keniry J. Anode signal analysis – the next generation in reduction cell control / J. Keniry, E. Shaidulin // *Essential readings in Light Metals 2016*. – Cham : Springer, 2016. – Vol. 2. – P. 838–843. – DOI: 10.1007/978-3-319-48156-2_125. – Текст : непосредственный.

91. Key features of STARprobe™ // Официальный сайт компании STAS : [сайт]. – URL: <https://www.stas.com/en/products/electrolysis/starprobetm/> (дата обращения: 15.02.2023).

92. Kolås S., Støre T. Bath temperature and AlF₃ control of an aluminium electrolysis cell // *Control Engineering Practice*. – 2009. – Т. 17. – №. 9. – С. 1035-1043 – Текст : непосредственный.
93. Mann, V. Environmental aspects of UC RUSAL's aluminum smelters sustainable development / V. Mann, V. Buzunov, V. Pingin, A. Zherdev, V. Grigoriev // *Light Metals 2019 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – P. 553–563. – DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_70. – Текст : непосредственный.
94. McMahon T.K., Dirth G.P. Computer control of aluminum reduction cells // *JOM*. – 1966. – Т. 18. – №. 3. – С. 317-319 – Текст : непосредственный.
95. Meyer, H.J. Anode effect prediction / H.J. Meyer, D.G. Earley // *Light Metals 1986*. – 1986. – Т. 2. – С. 365-370.
96. Mikhalev, A. Application of ensemble algorithms to detect anode effects in aluminum production / A. Mikhalev, N. Lugovaya, T. Penkova, I. Puzanov, A. Zavadyak // *CEUR Workshop Proceedings*. – Vol. 3047. – 2021. – P. 79–85. – URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3047/paper11.pdf> (дата обращения: 20.05.2023).
97. Mulder A. New generation control for daily aluminium smelter improvement generation 3 process control for potlines / A. Mulder, Y. Gao, D. Zhou, D. Wong, L. Ming, P. Lavoie, M. P. Taylor, X. Yang // *Light Metals 2014 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer, 2014. – P. 835–840. – DOI: 10.1007/978-3-319-48144-9_140. – Текст : непосредственный.
98. Oksengoyt, E.A. Modern equipment by Soyuztvetmetavtomatika for detecting aerosols and spills of harmful pollutants / E.A. Oksengoyt, N.A. Kunitskiy, P.A. Petrov, **A.K. Shestakov** – Текст : непосредственный // *Tsvetnye Metally*. – 2023. – №4. – P. 61-65, <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.08>.
99. Opportunities For Aluminium In A Post-Covid Economy // Официальный сайт International Aluminum Institute : [сайт]. – <https://international-aluminium.org/resources/opportunities-for-aluminium-in-a-post-covid-economy/> (дата обращения: 16.05.2023). – Текст : электронный.
100. Petrov, P.A. Use of multifunctional crust breaker and machine vision system for acquisition and processing of aluminium reduction cell data / P.A. Petrov, **A.K. Shestakov**, M.Yu. Nikolaev – Текст : непосредственный // *Tsvetnye Metally*. – 2023. – №4. – P. 45-53, <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.06>.
101. Pianykh A.A. Mathematical model of magnetic hydrodynamics and heat transfer in an aluminum reduction cell / A.A. Pianykh, G.V. Arkhipov, Y.A. Tretyakov // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2020. – Vol. 61, № 1. – P. 65–73. – DOI: 10.3103/S1067821220010125. – Текст : непосредственный.
102. Polyakov A.A., Analytical Modeling of Current and Potential Distribution over Carbon and Low-Consumable Anodes during Aluminum Reduction Process / Polyakov A.A., Gorlanov E.S.,

Mushihin E.A. // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2022. – № 169 (5). – DOI 10.1149/1945-7111/acba16. – Текст : непосредственный.

103. Potocnik V. History of computer control of aluminum reduction cells / V. Potocnik, M. Reverdy // *Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – P. 591–599. – DOI: 10.1007/978-3-030-65396-5_81. – Текст : непосредственный.

104. Primary Aluminium Production // Официальный сайт International Aluminum Institute : [сайт]. – URL: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/?publication=primary-aluminium-production> (дата обращения: 16.05.2023). – Текст : электронный.

105. Reverdy M., Alzarooni A. Emirates global aluminium state-of-the-art advanced pot control system—simple and flexible // *International Aluminium Journal*. – 2018. – Т. 94. – №. 1-2. – С. 32-34 – Текст : непосредственный.

106. Reverdy M. EGA’s progress in environment emissions reduction / M. Reverdy, V. Potocnik // *International Aluminium Journal*. – 2020. – Т. 96. – №. 1-2. – С. 60-61 – Текст : непосредственный.

107. Reverdy M. History of Inventions and Innovations for Aluminum Production / M. Reverdy, V. Potocnik // *TMS 2020 149th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. – Cham : Springer / Hoboken, NJ : The Minerals, Metals & Materials Society, 2020. – P. 1895 – 1910. – DOI: 10.1007/978-3-030-36296-6_175. – Текст : непосредственный.

108. Rieck T. et al. Increased current efficiency and reduced energy consumption at the TRIMET smelter Essen using 9 box matrix control // *Essential Readings in Light Metals: Volume 2 Aluminum Reduction Technology*. – Cham : Springer International Publishing, 2016. – С. 817-824 – DOI: 10.1007/978-3-319-48156-2_122 – Текст : непосредственный.

109. **Shestakov, A.K.** Automatic System for Detecting Visible Emissions in a Potroom of Aluminum Plant Based on Technical Vision and a Neural Network / **A.K. Shestakov**, P.A. Petrov, M.Y. Nikolaev. – Текст : непосредственный // *Metallurgist*. – 2023. – № 66. – С. 1308 – 1319. DOI: 10.1007/s11015-023-01445-z.

110. **Shestakov, A.K.** Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell / **A.K. Shestakov**, R.M. Sadykov, P.A. Petrov. – Текст : непосредственный // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2021*. – E3S Web of Conferences, 2021. – С. 1 – 12. DOI: 10.1051/e3sconf/202126609002.

111. Solheim, A. A novel design criterion for alumina feeders in aluminium electrolysis cells / A. Solheim // *Light Metals 2014: Minerals, Metals and Materials Series*. – Hoboken, NJ : Wiley Blackwell, 2014. – P. 709–716. – DOI: 10.1002/9781118888438.ch119. – Текст : непосредственный.

112. Solheim A. Current Efficiency in Aluminium Reduction Cells : Theories, Models, Concepts, and Speculations / A. Solheim // *Light Metals*. – 2014. – P. 753–758. – DOI: 10.1002/9781118888438.ch127. – Текст : непосредственный.

113. Solheim, A. Current efficiency in aluminium reduction cells: theories, models, concepts, and speculations/ A. Solheim // *Light Metals 2014 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer, 2014. – P. 753–758. – DOI: 10.1007/978-3-319-48144-9_127. – Текст : непосредственный.

114. Stanic N. Bubble Phenomena and Bubble Properties for Different Carbon Anodes in Cryolite Melt : Doctoral thesis / N. Stanic. – Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, 2022. – Doctoral theses at NTNU, 2022. – URL: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3031048> / (дата обращения: 20.05.2023). – Текст : электронный.

115. The Economics of Aluminum: Market Trends and Future Projections // Официальный сайт компании Elka: [сайт]. – URL: <https://elkamehr.com/en/the-economics-of-aluminum-market-trends-and-future-projections-in-2024/> (дата обращения: 20.05.2023). – Текст : электронный.

116. Thonstad, J. Aluminium electrolysis: Fundamentals of the Hall-Héroult process / J. Thonstad, P. Fellner, G. M. Haarberg [и др.]. – 3rd edition. – Dusseldorf : Aluminium-Verlag, 2001. – 359 с. – Текст : непосредственный.

117. Verreault, J. Retrofit of a combined breaker feeder with a chisel bath contact detection system to reduce anode effect frequency in a potroom / J. Verreault, B. Desgroseilliers, R. Gariépy, C. Simard, S. Simard, X. Delcorde, C. Turpain, S.P. Déry // *Light Metals 2011 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer, 2011. – P. 467–470. – DOI: 10.1007/978-3-319-48160-9_83. – Текст : непосредственный.

118. Wang X. Alcoa STARprobe™–Update in further development for measuring cryolite properties // *Light Metals 2016*. – 2016. – С. 395-402 – DOI: 10.1007/978-3-319-48251-4_65 – Текст : непосредственный.

119. Welch, B.J. Crust and alumina powder dissolution in aluminum smelting electrolytes / B.J. Welch, G.I. Kuschel // *JOM*. – 2007. – Vol. 59, № 5. – P. 50–54. – DOI: 10.1007/s11837-007-0065-9. – Текст : непосредственный.

120. Wong, D.S. Anode effect phenomena during conventional AEs, low voltage propagating AEs & non-propagating AEs / D.S. Wong, A. Tabereaux, P. Lavoie // *Light Metals 2014 : Minerals, Metals and Materials Series*. – Cham : Springer–2014. – P. 529–534. – DOI: 10.1007/978-3-319-48144-9_90. – Текст : непосредственный.

121. Wong, D.S. Continuous PFC emissions measured on individual 400 kA cells / D.S. Wong, J. Marks // *Light Metals 2013 : Minerals, Metals and Materials Series*. — Cham : Springer, 2013. – P. 865–870. – DOI: 10.1007/978-3-319-65136-1_147. – Текст : непосредственный.

122. Wong, D.S. PFC emissions from detected versus nondetected anode effects in the aluminum industry / D.S. Wong, P. Fraser, P. Lavoie, J. Kim // JOM. Minerals, Metals and Materials Society. – 2015. – Vol. 67, № 2. – P. 342–353. – DOI: 10.1007/s11837-014-1265-8. – Текст : непосредственный.

123. Zhang H. Progress in aluminum electrolysis control and future direction for smart aluminum electrolysis plant / H. Zhang, T. Li, J. Li, S. Yang, Z. Zou // JOM. Minerals, Metals and Materials Society. – 2017. – Vol. 69, № 2. – P. 292–300. – DOI: 10.1007/s11837-016-2150-4. – Текст : непосредственный.

124. Zhang, Q. The melting behaviour of aluminium smelter crust / Q. Zhang, M.P. Taylor, J. Chen // Light Metals 2014 : Minerals, Metals and Materials Series. – Cham : Springer, 2014. – P. 591–596. – DOI: 10.1007/978-3-319-48144-9_100. – Текст : непосредственный.

125. Zherdev, A. Environmental enhancement of potroom processes by using a machine vision system / A. Zherdev, A. Svoevskiy, V. Pingin, V. Shakhmatov, Y. Shtefanyuk // Light Metals 2022 : Minerals, Metals and Materials Series. – Cham : Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2022. – P. 979–984. – DOI: 10.1007/978-3-030-92529-1_127. – Текст : непосредственный.

126. Zhou, K. Anode effect prediction of aluminum electrolysis using GRNN / K. Zhou, D. Yu, Z. Lin, B. Cao, Z. Wang, S. Guo // Proceedings of 2015 Chinese Automation Congress (CAC 2015). – New York : IEEE, 2016. – P. 853–858. – DOI: 10.1109/CAC.2015.7382617. – Текст : непосредственный.

127. Zhou, K. Cell resistance slope combined with LVQ neural network for prediction of anode effect / K. Zhou, Z. Lin, D. Yu, B. Cao, Z. Wang, S. Guo // Proceedings of 2015 Sixth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP). – New York : IEEE, 2016. – P. 47–51. – DOI: 10.1109/ICICIP.2015.7388142. – Текст : непосредственный.

128. Zhou, K.B. Anode effect prediction based on a singular value thresholding and extreme gradient boosting approach / K.B. Zhou, Z.X. Zhang, J. Liu, Z.X. Hu, X.K. Duan, Q. Xu // Measurement Science and Technology. – 2019. – Vol. 30, № 1. – Article 015104. – DOI: 10.1088/1361-6501/aace5e. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ЗАЯВКА НА ПАТЕНТ

Форма № 94 ИЗ,ПМ,ПО-2016

Федеральная служба по интеллектуальной собственности
Федеральное государственное бюджетное учреждение



«Федеральный институт промышленной собственности»
(ФИПС)

Бережковская наб., д. 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП - 3, 125993

Телефон (8-499) 240-60-15 Факс (8-495) 531-63-18

УВЕДОМЛЕНИЕ О ПРИЕМЕ И РЕГИСТРАЦИИ ЗАЯВКИ

19.04.2023	W23020966	2023109899
<i>Дата поступления (дата регистрации)</i>	<i>Входящий №</i>	<i>Регистрационный №</i>

ДАТА ПОСТУПЛЕНИЯ <small>(дата регистрации) оригиналов документов заявки</small>	(21) РЕГИСТРАЦИОННЫЙ №	ВХОДЯЩИЙ №
(85) ДАТА ПЕРЕВОДА международной заявки на национальную фазу		
<input type="checkbox"/> (86) <small>(регистрационный номер международной заявки и дата международной подачи, установленные получателем патентных прав)</small>	АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ <small>(почтовый адрес, фамилия и инициалы или наименование адресата)</small> 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., д. 2, Патентно-лицензионный отдел (190106, Sankt-Peterburg, 21 liniya, V.O., d. 2)	
<input type="checkbox"/> (87) <small>(номер и дата международной публикации международной заявки)</small>	Телефон: 3288484 Факс: Адрес электронной почты: patent@spmi.ru	
ЗАЯВЛЕНИЕ о выдаче патента на полезную модель	В Федеральную службу по интеллектуальной собственности Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация	
(54) НАЗВАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОБОВКИ КРИОЛИТОГЛИНОЗЕМНОЙ КОРКИ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА		
(71) ЗАЯВИТЕЛЬ (фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) физического лица или наименование юридического лица (согласно учредительному документу), место жительства или место нахождения, название страны и почтовый индекс) Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Sankt-Peterburgskii gornyi universitet») 199106, Россия, 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2 (199106, Rossiya, 199106, Sankt-Peterburg, V.O., 21 liniya, d. 2)	ИДЕНТИФИКАТОРЫ ЗАЯВИТЕЛЯ ОГРН 1 02 78 00 50759 1 КПП ИНН СНИЛС ДОКУМЕНТ (серия, номер)	
<input checked="" type="checkbox"/> полезная модель создана за счет средств федерального бюджета Заявитель является: <input type="checkbox"/> государственным заказчиком <input type="checkbox"/> муниципальным заказчиком исполнитель работ (указать наименование) <input checked="" type="checkbox"/> исполнителем работ по: <input checked="" type="checkbox"/> государственному контракту <input type="checkbox"/> муниципальному контракту <input type="checkbox"/> соглашению о предоставлении субсидии <input type="checkbox"/> гранту <input checked="" type="checkbox"/> государственному заданию <input type="checkbox"/> муниципальному заданию заказчик работ (указать наименование) Министерство науки и высшего образования РФ Контракт от 12.03.2020 № 075-00314-20-02	КОД СТРАНЫ (если он установлен) RU	
В соответствии с условиями государственного контракта (договора, соглашения) права на созданные результаты интеллектуальной деятельности принадлежат: <input type="checkbox"/> Российской Федерации, от имени которой выступает государственный заказчик <input type="checkbox"/> Российской Федерации, от имени которой выступает государственный заказчик, и исполнителем совместно <input checked="" type="checkbox"/> исполнителю <input type="checkbox"/> иное		
(74) ПРЕДСТАВИТЕЛЬ (ПРЕДСТАВИТЕЛИ) ЗАЯВИТЕЛЯ <small>(указывается фамилия, имя, отчество (последнее – при наличии) лица, выполняющего заявки)</small>	<input type="checkbox"/> патентный поверенный <input checked="" type="checkbox"/> представитель по доверенности	

Общее количество документов в листах	24	Лицо, зарегистрировавшее документы
Из них: - количество листов комплекта изображений изделия (для промышленного образца)		Автоматизированная система
Количество платежных документов		
Сведения о состоянии делопроизводства по заявкам размещаются в Открытых реестрах на сайте ФИПС по адресу: www.fips.ru/registers-web		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации



Утверждаю

Генеральный директор АО «СоюзЦМА»
А.В. Дёмин

Дата « 11 » октября 2022 г.

АКТ

об внедрении результатов кандидатской диссертации
Шестакова Алексея Константиновича
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. отделом АСУ ТП – Соколов И.В., ведущий научный
сотрудник Шапировский М.Р., научный сотрудник Кузяков А.В.
составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему:
«Разработка автоматической системы сбора и обработки данных
алюминиевого электролизера с использованием многофункционального
пробойника и системы технического зрения», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук, рассмотрены на заседании НТС
АО «СоюзЦМА» выписка № 10 от 11.10.2022 и внедрены в производственную
деятельность, а именно использованы при разработке автоматической системы
обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода
на основе технического зрения и нейронной сети в виде:

- обученной сверточной нейронной сети RetinaNet, позволяющей распознавать видимые выбросы;
- технических предложений по выбору устройств обработки видеопотока NVIDIA Jetson Nano;
- разработанной распределенной архитектуры сети автоматической системы мониторинга выбросов;
- схемы расположения камер в электролизном цехе;
- технических предложений по выполнению конструктивных схем измерительной цепи переменного тока алюминиевого электролизера с использованием электрически изолированного пробойного устройства АПГ и схемы установки лазерного дальномера для измерения уровня электролита в электролизной ванне;
- измененного алгоритма управления системой АПГ, заключающегося в изменении частоты питания глиноземом при изменении уровня электролита и нарушении сплошности корки.

Использование указанных результатов позволило:

- разработать автоматическую систему обнаружения видимых выбросов на основе технического зрения и нейронной сети с общей точностью 94,8% и пригодной для обнаружения видимых выбросов загрязняющих веществ в атмосфере электролизного цеха;
- повысить отказоустойчивость системы мониторинга по сравнению с системой ОК РУСАЛ за счет использования распределенной архитектуры сети;
- снизить стоимость автоматической системы мониторинга видимых выбросов в 1,7 раза по сравнению с системой ОК РУСАЛ;
- значительно повысить скорость обнаружения видимых выбросов, нарушений сплошности (целостности) криолитоглиноземной корки по сравнению с визуальным наблюдением (рабочим персоналом) за счет системы технического зрения на основе нейронной сети, что позволяет оперативно восстановить укрытие электролизера, а также уменьшить интервал между питанием глиноземом, в результате уменьшается количество вредных веществ, попадающих в атмосферу электролизного цеха;
- снизить частоту анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов за счет алгоритма автоматического измерения уровня и электрического сопротивления электролита с использованием многофункционального пробойника, определяющего порцию глинозема, достаточную для ведения технологического процесса электролиза криолитоглиноземного расплава на низких значениях КО

Председатель комиссии:


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



Дёмин А.В.

Члены комиссии:

Заместитель генерального
директора, к.т.н.



Мальцев Н.Е.

Зав. отделом АСУ ТП



Соколов И.В.

Старший научный
сотрудник



Кузяков А.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Код программы шнекового питателя

```

void setup() {
  pinMode(2, OUTPUT); // dir+ (+5v) = направление вращения
  pinMode(3, OUTPUT); // pul+ (+5v) = шаг
  digitalWrite(2, LOW); // Устанавливаем направление против часовой стрелки (LOW)

  Serial.begin(9600); //
  Serial.println("Stepper motor control initialized.");
}

// Переменные для режима работы двигателя
bool motorRunning = false;
long targetSteps = 0; // Количество шагов для текущего режима
long stepCount = 0; // Счетчик выполненных шагов
int speedDelay = 60; // Задержка в микросекундах для управления скоростью

// Переменные для команды gram и gramT
const float one_step = 0.0000496093750; // Константа для расчета (коэффициент)

long move_step = 0; // Переменная для хранения количества шагов из gram
float gramValue = 0; // Хранит последнее значение X для gram
unsigned long gramInterval = 0; // Интервал повторения в миллисекундах
unsigned long lastGramTime = 0; // Время последнего выполнения gramT
const long stepsPerRevolution = 6400; // Количество микрошагов на один полный оборот

void resetMotor() {
  motorRunning = false; // Останавливаем двигатель
  targetSteps = 0; // Сбрасываем целевые шаги
  stepCount = 0; // Сбрасываем счетчик шагов
  Serial.println("Motor reset; ready for new command.");
}

void executeGramCommand(float grams) {
  move_step = static_cast<long>(grams / one_step); // Рассчитываем количество шагов
  Serial.print("Executing gram command. Calculated move_step: ");
  Serial.println(move_step);

  motorRunning = true;
  targetSteps = move_step;
  stepCount = 0;
}

void loop() {
  if (Serial.available() > 0) {
    String command = Serial.readStringUntil('\n'); // Читаем команду из Serial
    Serial.print("Received command: ");
    Serial.println(command); //
  }
}

```

```

if (command.startsWith("gramT")) {
    command.replace(" ", "");

    int commaIndex = command.indexOf(',');
    if (commaIndex != -1) {
        gramValue = command.substring(6, commaIndex).toFloat();
        float intervalSeconds = command.substring(commaIndex + 1).toFloat();
        gramInterval = intervalSeconds * 1000;
        Serial.print("Set gramT with gramValue: ");
        Serial.print(gramValue);
        Serial.print(" and interval: ");
        Serial.print(intervalSeconds);
        Serial.println(" seconds.");

        executeGramCommand(gramValue); // Запускаем первый цикл сразу же
    }
} else if (command == "start") {
    resetMotor();
    motorRunning = true;
    targetSteps = -1; // Устанавливаем -1 для бесконечного режима
    Serial.println("Motor started in continuous mode.");
} else if (command == "stop") {
    resetMotor(); // Останавливаем двигатель и сбрасываем параметры
    gramInterval = 0; // Останавливаем повторы gramT
    Serial.println("Motor stopped.");
} else if (command == "start_360") {
    resetMotor();
    motorRunning = true;
    targetSteps = stepsPerRevolution;
    stepCount = 0;
    Serial.println("Motor started in 360-degree mode.");
} else if (command == "start_270") {
    resetMotor();
    motorRunning = true;
    targetSteps = stepsPerRevolution * 3 / 4;
    stepCount = 0;
    Serial.println("Motor started in 270-degree mode.");
} else if (command == "start_180") {
    resetMotor();
    motorRunning = true;
    targetSteps = stepsPerRevolution / 2;
    stepCount = 0;
    Serial.println("Motor started in 180-degree mode.");
} else if (command == "start_135") {
    resetMotor();
    motorRunning = true;
    targetSteps = stepsPerRevolution * 3 / 8;
    stepCount = 0;
    Serial.println("Motor started in 135-degree mode.");
} else if (command == "start_90") {
    resetMotor();

```

```

    motorRunning = true;
    targetSteps = stepsPerRevolution / 4;
    stepCount = 0;
    Serial.println("Motor started in 90-degree mode.");
} else if (command == "start_45") {
    resetMotor();
    motorRunning = true;
    targetSteps = stepsPerRevolution / 8;
    stepCount = 0;
    Serial.println("Motor started in 45-degree mode.");
} else if (command.startsWith("set_speed")) {
    int newSpeed = command.substring(10).toInt();
    if (newSpeed > 0) {
        speedDelay = newSpeed;
        Serial.print("Speed set to: ");
        Serial.println(speedDelay);
    }
} else if (command.startsWith("move ")) {
    long revolutions = command.substring(5).toInt();
    if (revolutions > 0) {
        resetMotor();
        motorRunning = true;
        targetSteps = revolutions * stepsPerRevolution;
        stepCount = 0;
        Serial.print("Moving ");
        Serial.print(revolutions);
        Serial.print(" revolutions (");
        Serial.print(targetSteps);
        Serial.println(" steps).");
    } else {
        Serial.println("Invalid move command; revolutions must be positive.");
    }
} else if (command.startsWith("move_step ")) {
    long steps = command.substring(10).toInt();
    if (steps > 0) {
        resetMotor();
        motorRunning = true;
        targetSteps = steps;
        stepCount = 0;
        Serial.print("Moving ");
        Serial.print(steps);
        Serial.println(" steps.");
    } else {
        Serial.println("Invalid move_step command; steps must be positive.");
    }
} else if (command.startsWith("gram ")) {
    gramValue = command.substring(5).toFloat();
    executeGramCommand(gramValue);
}
}

```

// Проверка условий для работы двигателя

```
if (motorRunning) {
  if (targetSteps == -1 || stepCount < targetSteps) { // -1 для бесконечного режима
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(3, HIGH);
    delayMicroseconds(speedDelay);
    stepCount++;

    if (targetSteps != -1 && stepCount >= targetSteps) { // Только если не бесконечный режим
      resetMotor();
      move_step = 0;
      lastGramTime = millis(); // Устанавливаем время завершения после выполнения
    }
  }
}

// Проверка интервала для повторного выполнения команды gramT
if (gramInterval > 0 && !motorRunning && (millis() - lastGramTime >= gramInterval)) {
  lastGramTime = millis(); // Обновляем время последнего выполнения
  executeGramCommand(gramValue);
}
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Удельное сопротивление графитизированного анода марки УНР

Таблица Г.1 – Значения удельного сопротивления графитизированного анода марки УНР от изменения температуры. Составлено автором по результатам эксперимента

t, °C	Rad,bc, мкОм	Rab,cd, мкОм	Rad,bc, Ом	Rab,cd, Ом	ρ , Ом·м	ρ , мкОм·м	ρ , Ом·мм ² /м
25	82,249	254,96	0,000082249	0,00025496	7,29788E-06	7,297883813	7,297883813
50	80,621	248,07	0,000080621	0,00024807	7,11354E-06	7,11353709	7,11353709
60	80,572	246,08	0,000080572	0,00024608	7,06941E-06	7,069409012	7,069409012
70	79,551	244,36	0,000079551	0,00024436	7,01009E-06	7,010088236	7,010088236
80	78,628	242,05	0,000078628	0,00024205	6,94012E-06	6,940119586	6,940119586
90	77,713	239,07	0,000077713	0,00023907	6,85582E-06	6,855823919	6,855823919
100	76,457	238,8	0,000076457	0,0002388	6,8228E-06	6,822798197	6,822798197
110	76,878	235,69	0,000076878	0,00023569	6,7646E-06	6,764602806	6,764602806
120	75,877	234,69	0,000075877	0,00023469	6,7213E-06	6,721297125	6,721297125
130	77,769	232,82	0,000077769	0,00023282	6,72177E-06	6,72177325	6,72177325
140	76,324	231,86	0,000076324	0,00023186	6,66972E-06	6,669724192	6,669724192
160	75,96	231,24	0,00007596	0,00023124	6,64843E-06	6,648428445	6,648428445
170	76,896	229,96	0,000076896	0,00022996	6,64098E-06	6,64098359	6,64098359
180	76,533	228,77	0,000076533	0,00022877	6,60737E-06	6,607373534	6,607373534
190	76,268	227,58	0,000076268	0,00022758	6,57588E-06	6,575884395	6,575884395
200	76,188	227,05	0,000076188	0,00022705	6,56268E-06	6,562682763	6,562682763
210	76,178	226,66	0,000076178	0,00022666	6,55403E-06	6,554025955	6,554025955
220	75,338	226,38	0,000075338	0,00022638	6,52979E-06	6,529786893	6,529786893
230	75,42	225,16	0,00007542	0,00022516	6,50516E-06	6,505158275	6,505158275
240	75,914	226	0,000075914	0,000226	6,53403E-06	6,534028729	6,534028729
250	76,594	225,42	0,000076594	0,00022542	6,53619E-06	6,536192931	6,536192931
260	76,44	225,58	0,00007644	0,00022558	6,53632E-06	6,536322783	6,536322783
270	76,848	225,8	0,000076848	0,0002258	6,54991E-06	6,549913971	6,549913971
280	77,7	226,86	0,0000777	0,00022686	6,59129E-06	6,591293513	6,591293513
330	78,151	224,5	0,000078151	0,0002245	6,54998E-06	6,549978897	6,549978897
340	78,858	225,85	0,000078858	0,00022585	6,5945E-06	6,594496532	6,594496532
350	79,487	224,14	0,000079487	0,00022414	6,5711E-06	6,571101509	6,571101509
360	78,598	224,27	0,000078598	0,00022427	6,55468E-06	6,554675216	6,554675216
370	78,042	225,72	0,000078042	0,00022572	6,57402E-06	6,574023181	6,574023181
380	80,144	224,91	0,000080144	0,00022491	6,60198E-06	6,601984671	6,601984671
390	79,234	225,96	0,000079234	0,00022596	6,60501E-06	6,605014553	6,605014553
400	80,558	224,49	0,000080558	0,00022449	6,60185E-06	6,601854818	6,601854818
410	79,224	225,33	0,000079224	0,00022533	6,59116E-06	6,591163661	6,591163661
420	79,577	223,66	0,000079577	0,00022366	6,56266E-06	6,562661121	6,562661121
430	80,625	226,69	0,000080625	0,00022669	6,65092E-06	6,650917277	6,650917277
440	80,815	225,17	0,000080815	0,00022517	6,62213E-06	6,622133391	6,622133391
450	81,649	226,52	0,000081649	0,00022652	6,6694E-06	6,669399562	6,669399562

Продолжение Таблицы Г.1

t, °C	Rad, bc, мкОм	Rab, cd, мкОм	Rad, bc, Ом	Rab, cd, Ом	ρ , Ом·м	ρ , мкОм·м	ρ , Ом·мм ² /м
460	81,372	226,75	0,000081372	0,00022675	6,66838E-06	6,668382387	6,668382387
470	80,625	228,25	0,000080625	0,00022825	6,68468E-06	6,684678828	6,684678828
480	82,734	226,5	0,000082734	0,0002265	6,69245E-06	6,692448313	6,692448313
490	82,624	226,32	0,000082624	0,00022632	6,68617E-06	6,686172127	6,686172127
500	80,702	229,1	0,000080702	0,0002291	6,70474E-06	6,70474098	6,70474098
510	82,322	227,74	0,000082322	0,00022774	6,71037E-06	6,710367905	6,710367905
520	81,989	228,91	0,000081989	0,00022891	6,72848E-06	6,728482276	6,728482276
530	84,179	229,28	0,000084179	0,00022928	6,78389E-06	6,783885846	6,783885846
540	84,49	229,25	0,00008449	0,00022925	6,78997E-06	6,789967254	6,789967254
550	84,109	229,05	0,000084109	0,00022905	6,77739E-06	6,77739324	6,77739324
560	83,502	229	0,000083502	0,000229	6,76317E-06	6,763174433	6,763174433
570	85,556	229,25	0,000085556	0,00022925	6,81304E-06	6,813037647	6,813037647
580	85,365	231,25	0,000085365	0,00023125	6,85219E-06	6,85218806	6,85218806
590	85,753	231,85	0,000085753	0,00023185	6,87357E-06	6,873570376	6,873570376
600	86,321	232,16	0,000086321	0,00023216	6,89257E-06	6,892572069	6,892572069
610	86,675	233,47	0,000086675	0,00023347	6,92858E-06	6,92858439	6,92858439
620	87,555	234,77	0,000087555	0,00023477	6,97576E-06	6,975763992	6,975763992
640	87,374	235,36	0,000087374	0,00023536	6,98462E-06	6,984615579	6,984615579
650	89,458	236,67	0,000089458	0,00023667	7,05807E-06	7,058068593	7,058068593
660	90,144	239,11	0,000090144	0,00023911	7,12572E-06	7,125721547	7,125721547
670	89,883	241	0,000089883	0,000241	7,16098E-06	7,160976397	7,160976397
680	89,989	244,3	0,000089989	0,0002443	7,23469E-06	7,234689116	7,234689116
690	88,337	247,38	0,000088337	0,00024738	7,26559E-06	7,26559392	7,26559392
700	90,497	250,03	0,000090497	0,00025003	7,36969E-06	7,369692035	7,369692035
710	91,042	252,08	0,000091042	0,00025208	7,42585E-06	7,425853076	7,425853076
720	89,564	252,53	0,000089564	0,00025253	7,40361E-06	7,403605079	7,403605079
730	90,612	254,19	0,000090612	0,00025419	7,46221E-06	7,462211669	7,462211669
740	92,348	255,94	0,000092348	0,00025594	7,53766E-06	7,537655749	7,537655749
750	92,964	255,69	0,000092964	0,00025569	7,54558E-06	7,545576729	7,545576729
760	92,459	256,23	0,000092459	0,00025623	7,54633E-06	7,546334199	7,546334199
770	92,731	257,89	0,000092731	0,00025789	7,58815E-06	7,588146581	7,588146581
780	93,918	258,89	0,000093918	0,00025889	7,63548E-06	7,635477678	7,635477678
790	94,195	259,48	0,000094195	0,00025948	7,65424E-06	7,654241309	7,654241309
800	94,9	260,77	0,0000949	0,00026077	7,69742E-06	7,697417139	7,697417139
810	94,458	261,85	0,000094458	0,00026185	7,71122E-06	7,711224747	7,711224747
820	95,546	262,42	0,000095546	0,00026242	7,74711E-06	7,747107216	7,747107216
830	101,01	271,7	0,00010101	0,0002717	8,0662E-06	8,066197154	8,066197154
840	100,41	272,42	0,00010041	0,00027242	8,06879E-06	8,068794196	8,068794196
850	102,83	274,66	0,00010283	0,00027466	8,16965E-06	8,169646008	8,169646008
860	102,87	276,27	0,00010287	0,00027627	8,20536E-06	8,20535534	8,20535534
870	103,8	276,39	0,0001038	0,00027639	8,22808E-06	8,228079461	8,228079461
880	104,09	276,64	0,00010409	0,00027664	8,23977E-06	8,239766152	8,239766152
890	104,94	279,51	0,00010494	0,00027951	8,32027E-06	8,320274465	8,320274465
900	105,45	282	0,00010545	0,000282	8,3852E-06	8,385200524	8,385200524

Продолжение Таблицы Г.1

t, °C	Rad,bc, мкОм	Rab,cd, мкОм	Rad,bc, Ом	Rab,cd, Ом	ρ , Ом·м	ρ , мкОм·м	ρ , Ом·мм ² /м
910	106,68	282,89	0,00010668	0,00028289	8,43108E-06	8,431081606	8,431081606
920	107,55	283,64	0,00010755	0,00028364	8,46614E-06	8,466141678	8,466141678
940	107,88	284,73	0,00010788	0,00028473	8,49687E-06	8,496873345	8,496873345
970	108,87	286,35	0,00010887	0,00028635	8,55336E-06	8,553359017	8,553359017
980	110,51	287,17	0,00011051	0,00028717	8,6066E-06	8,606598385	8,606598385
990	111,13	289,29	0,00011113	0,00028929	8,6659E-06	8,665897519	8,665897519
1000	112,05	290,88	0,00011205	0,00029088	8,72022E-06	8,720218989	8,720218989