

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт цветных металлов и материаловедения
Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Н.В. Белоусова
подпись, инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование возможности повышения тока и улучшения ТЭП на
электролизерах С-255

Направление 22.04.02 «Металлургия»

Программа 22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Научный руководитель

подпись, дата

канд. техн. наук, доцент
должность, ученая степень

П.В. Поляков
инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

П.А. Панин
инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

Инженер-технолог участка управления
технологией в корпусах электролиза
АО «РУСАЛ Саяногорск»
должность, ученая степень

Д.В.Звягинцев
инициалы, фамилия

Консультанты

подпись, дата

канд. эконом. наук, доцент
должность, ученая степень

Т.В. Твердохлебова
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

профессор, д-р хим. наук.
должность, ученая степень

Н.В. Белоусова
инициалы, фамилия

Красноярск 2020

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа по теме «Исследование возможности повышения силы тока и улучшения ТЭП на электролизерах С-255» содержит 81 страницы текстового документа, 19 рисунков, 21 таблица, 69 использованных источников.

Объектом исследования является электролизер для получения алюминия С-255.

Целью выпускной квалификационной работы является нахождение путей, благодаря которым, появится возможность увеличить силу тока на действующем электролизере С-255 и улучшить технико-экономические показатели (ТЭП) без негативных последствий.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить работу подсистем электролизера: анодного массива, катодного устройства, ошиновки электролизера, подсистему электролита, металла, системы питания электролизера.
- предложить и обосновать технологические решения для модификации подсистем электролизера С-255.

Методы исследования:

- Изучение мировой общедоступной литературы;
- Применение заводского опыта.

Практическая значимость работы

- Увеличение производительности электролизера.
- Снижение себестоимости.

Содержание

Введение	4
1 Литобзор	6
1.1 Эволюция конструкции и технологии	13
1.2 Основные процессы и технико-экономические показатели электролиза	16
1.3 Конструкции электролизеров	23
1.3.1 Катодное устройство	26
1.3.2. Анодное устройство	30
1.3.3. Системы газоулавливания	33
1.3.4. Ошиновка электролизеров	34
1.3.5. Подсистема электролит	37
1.3.6. Система АПГ	40
2 Электролизер С-255	42
2.1 Технико-экономические показатели электролизера С-255	43
3 Мировой опыт для совершенствования С-255	44
3.1.1 Модернизация анодного устройства	44
3.1.2 Модернизация катодного устройства	50
3.1.3 Модернизация ошиновки	56
4 Экономическая часть	61
5 Заключение	69
Список сокращений	71
Список используемых источников	72

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время получение алюминия в промышленных масштабах осуществляется методом электролиза криолитоглиноземных расплавов, который с момента открытия в 1886 году не претерпел радикальных изменений. В настоящее время развитие алюминиевой отрасли происходит в условиях жесткой конкурентной борьбы за рынки сбыта, где ключевыми факторами являются – высокое качество готовой продукции и её себестоимость.

Как известно, главным условием развития любого производства является периодическая или непрерывная модернизация оборудования. На действующих электролизерах рост количества получаемого алюминия достигается за счет технических показателей – повышения выхода по току и роста силы тока в пределах, допускаемых данной конструкцией. В последнее время алюминиевые заводы стремятся повысить единичную мощность действующего электролизера [1-3], а также запустить в производство новые более мощные ванны. Задача по сокращению затрачиваемой энергии остается весьма актуальной [4]. Повышение силы тока на электролизерах приводит не только к росту производительности ванны, но и к необходимости изменения технологии и конструкции отдельных узлов ванн. При повышении тока следует задуматься над вопросом: «При какой максимальной силе тока магнитогидродинамические (МГД) эффекты начинают ухудшать работу ванны до такой степени, что перекрывают преимущества от повышенной выработки металла».

Стоит отметить, сила тока является важным инструментом для изменения производительности алюминиевого завода в качестве быстрого реагирования на рыночные изменения [5].

В настоящей работе поставлена задача - найти варианты модернизации электролизеров С-255 (электролизёр с предварительно обожженным анодом) с целью повышения силы тока для увеличения производительности действующих электролизеров.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить работу подсистем электролизера: анодного массива, катодного устройства, ошиновки электролизера, подсистему электролита, металла, системы питания электролизера.

- предложить и обосновать технологические решения для модификации подсистем электролизера С-255.

Методы исследования:

- Изучение мировой общедоступной литературы;
- Применение заводского опыта.

Практическая значимость работы

- Увеличение производительности электролизера.
- Снижение себестоимости выпускаемого алюминия.

Целью выпускной квалификационной работы является нахождение путей, благодаря которым, появится возможность увеличить силу тока на действующем электролизере С-255 и улучшить технико-экономические показатели (ТЭП) без негативных последствий.

1. Литобзор

Первичный алюминий получают электролизом из глинозема. Это происходит в электролизерах, которые представляет собой ванну с расплавленным электролитом. Основным компонентом электролита является фтористая соль криолит Na_3AlF_6 . Расплавленный криолит является электролитом, где и происходит разложение глинозема в электрохимическом процессе. Катодом в электролитическом процессе является алюминиевая «лужа». Катод электролизера, футерован углеродными блоками. Аноды представляют собой угольные блоки, которые постепенно погружаются в криолит по мере их сгорания. Угольные аноды требуют периодической замены, так как сгорают в процессе работы. Криолит в процессе электролиза практически не расходуется. Глинозем постепенно добавляют в расплав электролизера поточной обработкой (либо, используя систему АПГ), где он растворяется. Температура расплава в здоровом электролизере составляет от 950 до 970°C. Жидкий алюминий образуются на поверхности раздела металл-электролит, и скапливается на катоде, это и есть первичный алюминий. Расплавленный алюминий выливают из электролизера. К электролизеру подают постоянный электрический ток. Напряжение на электролизере составляет 3,7-4,7 вольта, а сила тока составляет 175 – 550 кА. В инженерном цехе РУСАЛ ведутся разработки электролизера с током 1000 кА. На производство 1 кг алюминия требуется примерно 1,9 кг глинозема, 0,5 кг углерода и около 14 кВт ч электроэнергии.

Электролизер для производства алюминия это инженерное сооружение, в котором совмещены электрические, тепловые и химические процессы. Преобразовываясь внутри электролизера, протекают материальные и энергетические потоки. На рис.1 схематично представлен электролизер с обожженными анодами, для производства алюминия.

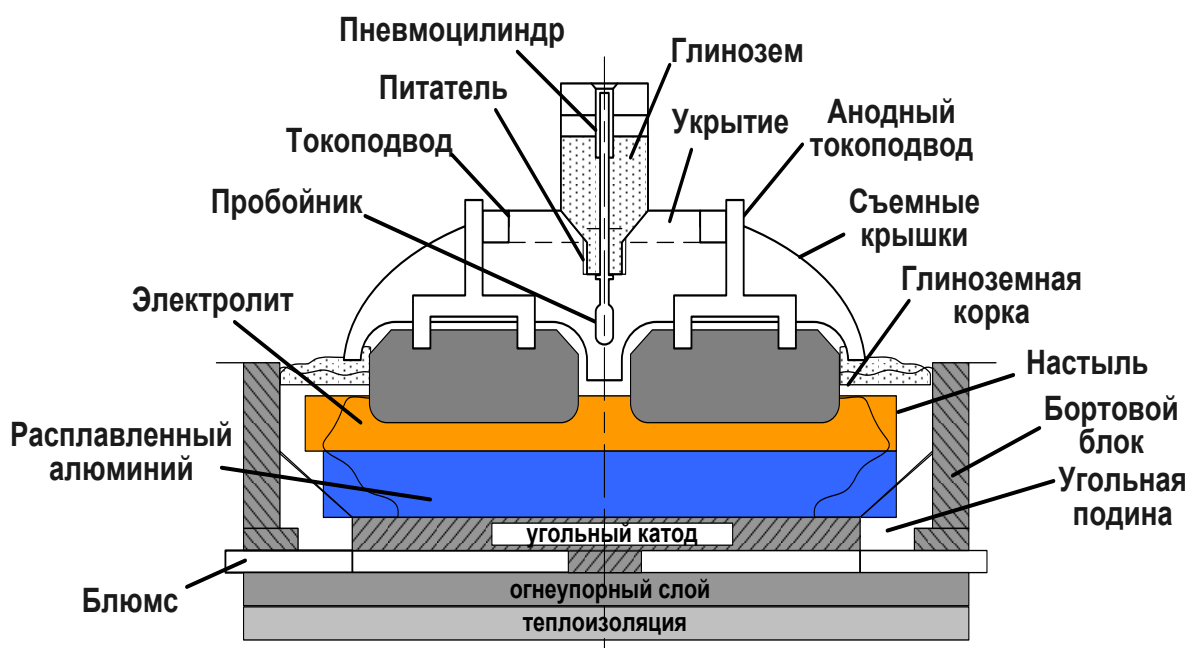


Рисунок 1– Схематичный поперечный разрез электролизёра ОА

В последнее время мировая алюминиевая промышленность в основном развивается двумя путями:

- модернизацией действующих производственных мощностей;
- созданием сверхмощных электролизеров, рассчитанных на силу тока 550 кА и выше.

Результатом развития этих направлений является стремление достигнуть алюминиевыми компаниями как можно более низкой себестоимости выпускаемого металла [7-9].

Модернизация электролизеров, как правило, проводится для увеличения силы тока (кроме той, которая имеет экологическую направленность). Простое увеличение силы тока на электролизёре приведет к нарушению параметров здоровья.

Параметры здоровья электролизера

Под параметрами здоровья электролизера принимают величины, которые характеризуют особенности конструкции электролизера и технологического процесса.

Параметры подразделяют на геометрические (длина, ширина, площадь, объем), электрические (напряжение, сила тока, мощность, электрическое сопротивление), магнитные (индукция магнитного поля, электромагнитная сила), тепловые (температура, теплопроводность, теплоемкость) и т.д. По этим параметрам, оценивается работа электролизера.

1. Температура электролита оказывает существенное влияние на производительность электролизера.

Состав электролита наиболее существенно влияет на ТЭП. Лучшие показатели достигаются, когда электролит имеет криолитовое отношение (КО) 2,2-2,4.

2. Количество технологического алюминия характеризуется уровнем металла в ванне.

Масса металла влияет на рабочие параметры:

- энергетический баланс;
- МГД устойчивость расплава;
- скорость движения металла;
- ФРП;
- скорость движения электролита над металлом.

3. Форма рабочего пространства (ФРП) характеризуется обязательным наличием гарниссажа в зоне электролита, крутопадающей настылью в зоне металла и отсутствием осадка и настыли на подине под анодом. Здоровый электролизер имеет устойчивый бортовой гарниссаж, переходящий в крутопадающую настыль в зоне металла, не заходящую под анод. От конфигурации ФРП зависит распределение тока в расплаве.

В ходе эксплуатации в электролизере появляются различные нарушения, которые можно разделить:

- нарушения, связанные с изменением теплового режима ванны;
- нарушения, вызванные изменением состава электролита;
- нарушения в анодном узле.

Такое разделение достаточно условно, поскольку многие виды нарушений взаимосвязаны — одно нарушение может порождать другое, и не всегда удастся установить первопричину возникновения того или иного технологического нарушения.

При увеличении силы тока необходимо изменять и конструктивные параметры электролизёра, что является основной задачей исследования.

Электролизер является сложной системой, основывающейся на ряде стационарных состояний – тепловом, электрическом, магнитном и магнитогидродинамическом. Хорошо известно, что электролизеры, работающие с чрезмерным расходом энергии, обычно обеспечивают ухудшенные показатели. Увеличение силы тока на определенном электролизере требует обширного опыта и знания технологий.

1. Наличие необходимых средств и оборудования для выполнения научно-исследовательских и конструкторских проектных работ:

1.1. Наличие эффективных моделей, достоверно описывающих поведение электролизера.

1.2. Надежности исходной конструкции электролизера для возможности работы с дополнительным током.

2. Проверенные технологические усовершенствования:

- увеличение сечения анододержателей;
- более длинные аноды;
- аноды с пазами;
- графитизированные катодные блоки.

Следует учитывать, что увеличение площади анодного массива приведет к изменению теплового баланса электролизера. Необходимо учесть возможное изменение теплового баланса электролизера при переходе на «длинные» аноды и запланировать корректирующие мероприятия. С увеличением длины анодного блока, объем погруженной части анодного массива существенно увеличится, что, в свою очередь, приведет к снижению объема электролита в электролизере.

В случае увеличения длины анодного блока за счет уменьшения центрального канала увеличиваются риски обеспечения нормальной подачи глинозема в расплав через точки питания в связи с их заростанием и ухудшения циркуляции электролита в зоне точек питания. Последнее приведет к увеличению частоты анодных эффектов и нарушению теплового баланса электролизера ввиду неравномерной подачи фторсолей через систему АПФ.

Известно, что повышение силы тока вызывает увеличение индукции магнитного поля и плотности токов в расплаве катодного металла, что, соответственно, приводит к увеличению сил Лоренца, росту статического и динамического перекося поверхности металла и скорости его циркуляции. Особую опасность для показателей работы электролизера представляет незатухающее волнение металла, поддерживаемое электромагнитным полем. Совокупность вышеуказанных явлений приводит к снижению технико-экономических показателей ТЭП [10].

Себестоимость металла зависит от технико-экономических показателей, под которыми, понимаются:

- 1) набор расходных коэффициентов материалов и ресурсов, используемых для питания электролизера в расчете на одну тонну металла;
- 2) показатели качества металла, влияющие на его цену;
- 3) срок службы электролизера;
- 4) количество и состав выбросов, прямо влияющих на себестоимость соответствующими экологическими и иными платежами;
- 5) оплату труда.

Экономические показатели в расчете на 1 т алюминия приведены в таблице 1.

Увеличение силы тока на электролизерах без дополнительных мероприятий приведет к следующим негативным последствиям:

- увеличению температуры расплава;
- дополнительной нагрузке на ошиновку;

- увеличению вектора магнитная индукции;
- увеличению удельного расхода анодов;
- увеличению удельного расхода фторсолей;
- сокращению срока службы электролизера.

Таблица 1 - Показатели современных электролизеров с обожженными анодами

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Диапазон измерения
Ток	I	кА	175-650
Выход по току	η	%	0,92-0,96
Удельный расход электроэнергии	W	кВт×ч/кг	12,0-14,0
Расход глинозема	$P_{Al_2O_3}$	кг Al_2O_3 /кг Al	1,91-1,93
Расход углерода	P_C	кг C/кг Al	0,39-0,40
Расход фторида алюминия	P_{AlF_3}	кг F/кг Al	0,017-0,040
Срок службы	Z	сутки	1500-3600
Трудозатраты	T	т/человекогод	100 - 700
Качество металла	Q	% Al	99,70 – 99,90
Экологические показатели	Ξ	Согласно принятым международным нормативам (например, конвенции OSPAR)	

Одни показатели относятся к работе одного электролизера, другие – к работе корпуса электролиза, цеха или завода. Главные показатели, которые используются в расчетах электролизеров:

- сила тока I ;
- напряжение на электролизере U ;
- производительность P_{Al} – масса полученного металла в единицу времени;
- выход по току η – величина, равная отношению массы металла, фактически полученной при электролизе к теоретически ожидаемой массе металла за то же время, рассчитываемой по закону Фарадея, выражают в процентах [11-13].

- удельный расход электроэнергии W – расход электроэнергии на единицу массы получаемого металла;
- анодная плотность тока i_a – величина, равная отношению силы тока к геометрической площади анода, через которую протекает электрический ток. В некоторых расчетах используют катодную плотность тока i_k – величину, равную отношению силы тока к площади слоя алюминия на подине. $i_a \approx (1,1/1,5)i_k$;
- температура электролита;
 - состав электролита (КО, % мас. глинозема, CaF_2 и других фторидов, если они добавляются в электролит);
 - расстояние между катодом и анодом (междуполусное расстояние МПР);
 - высота металла h_m ;
 - высота слоя электролита $h_{эл}$;
 - расходы глинозема (p_g), углерода (p_c), фторидных солей (p_f) – величины масс веществ, расходуемых при электролизе для получения единицы массы металла или в единицу времени.

Увеличение силы тока на электролизерах без дополнительных мероприятий приведет к следующим негативным последствиям:

- увеличению температуры расплава;
- дополнительной нагрузке на ошиновку;
- увеличению вектора магнитная индукции;
- увеличению удельного расхода анодов;
- увеличению удельного расхода фторсолей;
- сокращению срока службы электролизера.

Перед поднятием тока на электролизере необходимо провести ряд мероприятий для устранения негативных последствий:

- изменить МПР;
- увеличить площадь анодного массива;

- при необходимости дополнительно охладить металлоконструкций катодного устройства;
- изменить величину засыпки анодов и т.д.

Дополнительных проблем добавляют усилившиеся магнитные поля, создаваемые шинопроводами, отрицательно действуя на катодный металл. С увеличением силы тока усиливаются требования к конструкции ошиновки электролизера, от которой зависит сбалансированность магнитного поля в ванне [7, 14].

При повышении силы тока одним из главных условий остается срок службы электролизера, который не должен сократиться. Основными факторами, влияющими на срок службы электролизеров [15-16]:

- стабильные технологические параметры;
- совершенная конструкция катодных и анодных узлов.

На стабильную технологию большое влияние оказывает конструкция электролизера, состав электролита, МГД-процессы, применение АПГ [17].

1.1 Эволюция конструкции и технологии

С открытием в 1886 г. электролитического способа производства началось бурное развитие алюминиевой промышленности [18].

Как известно, история многотоннажного промышленного производства алюминия начинается с 1886 г., когда Поль Эру (Франция) и Чарльз Холл (США), независимо друг от друга, предложили получать алюминий электролизом глинозема в расплавленном криолите.

В действительности первым заявку на патент подал С.S. Bradley, но первый патент получил в 1889 г., а последний – в 1892 г. Патент Брэдли предусматривал поддержание температуры внутри ванны за счет джоулева тепла, выделяющегося при электролизе, тогда как патент Холла предусматривал наружный обогрев электролизера. Первый промышленный электролиз Холла, оказался неудачным. Длительное разбирательство между компаниями завершилось решением суда, согласно которому компания

Холла Pittsburg Reduction Co обязалась платить роялти компании Cowles* (владельцу патента Брэдли) до истечения срока действия патента последнего, а патенты Холла рассматривались как совершенствование патента Брэдли. Распространенное в мире название процесса (процесс Эру – Холла) обязано эффективной работе М. Холла по промышленному внедрению технологии[19].

Патенты Эру и Холла были идентичными и сделанными почти одновременно, по взаимному согласию, установилась практика, по которой патент Эру применялся в Европе, а Холла – в США и Канаде.

В 1888 г Ч. Холл организовал первое производство алюминия в г. Кенсингтоне близ Питтсбурга (США). В цехе были установлены две ванны, работавшие на силе тока 1800 А, производившие 22,5 кг алюминия в сутки [9]. Первое производство алюминия было организовано, во Франции в 1888 г. металлургическим обществом (SocieteElectrometallurgique), которое работало по патенту П. Эру. Затем, начал работать завод Фрож в департаменте Изер. За десять лет (1890-1899 гг.) выпуск алюминия составил уже 28 тыс.т., в 1930 г. его производство достигло 270 тыс.т., а в 1973 г. - 10 млн.т. В настоящее время производство первичного алюминия превышает 68 млн.т. в год и продолжается сооружение новых мощностей. Производство алюминия превратилось в мощную отрасль мирового хозяйства и многие современные достижения науки и техники (авиация и транспорт, атомная техника, упаковка пищевых продуктов, строительство) вообще были бы невозможны без широкого применения алюминия [20].

14 мая 1932 г. является днем рождения Российской алюминиевой промышленности. Именно тогда Волховский алюминиевый завод (ВАЗ) выдал первый алюминий. В 1933 г. состоялся пуск Днепровского алюминиевого завода (ДАЗ), в 1939 г. начато строительство Уральского алюминиевого завода (УАЗ), в 1943 г. в эксплуатацию был введен Новокузнецкий алюминиевый завод (НКАЗ). В 1945 г. выдал первый алюминий Богословский алюминиевый завод (БАЗ). В последующие годы

были построены алюминиевые заводы в г. Кандалакша (КАЗ), Надвойцах (НАЗ) и Волгограде (ВГАЗ). В связи с наличием дешевой электрической энергии бурно развивалось строительство алюминиевых заводов в Сибири: Шелехове (ИрКАЗ), Красноярске (КрАЗ), Братске (БрАЗ) и Саяногорске (СаАЗ). Сравнительно недавно (2003г.) введен в эксплуатацию Хакасский алюминиевый завод (ХАЗ) – гордость отечественной промышленности, а также пятая серия ИрКАЗа. Богучанский алюминиевый завод (БоАЗ) пущен в 2013г.

Уникальным путем идет алюминиевая промышленность Китая. Столкнувшись с рядом проблем, в том числе с уменьшением прибыли, из-за дорогой энергии, и проблем с экологией, было принято решение отказаться от устаревших технологий. Были закрыты заводы оборудованные электролизерами Содерберга и малые электролизеры с обожженными анодами с силой тока менее 160 кА, вместо которых строятся современные заводы. Разработав большие электролизеры с силой тока 300–500 кА, и внедрив технологии энергосбережения были получены впечатляющие результаты. Теоретически потенциал энергосбережения алюминиевых электролизеров еще не исчерпан, и ожидается внедрение новых технологий по результатам практических испытаний. Все новые энергосберегающие технологии на китайских алюминиевых заводах имеют свои уникальные особенности и позволяют в той или иной мере снизить энергопотребление. В настоящее время китайскими заводами был достигнут показатель 12500 кВт×ч/т, что представляет собой достижение мирового уровня. Технология электролизеров с силой тока 400–500 кА уже надежно отработана в Китае, в ближайшем будущем планируется запуск электролизеров с силой тока 600 кА. Постепенно китайская алюминиевая промышленность сможет достичь показателя энергопотребления 12000 кВт×ч/т, придерживаясь общемирового [21].

За весь период развития алюминиевой промышленности, приоритетом в совершенствовании конструкции алюминиевых электролизеров являлся

рост единичной мощности, улучшение ТЭП, снижение расхода электроэнергии, улучшение условий труда и уменьшение вредных промышленных выбросов.

1.2 Основные процессы и технико-экономические показатели электролиза

Глинозем, который используется в качестве основного сырьевого элемента, имеет высокую температуру плавления (2049°C). Температура в ванне при нормальном технологическом режиме электролиза составляет от 950°C до 965°C . Поэтому глинозем в электролите не расплавляется, а растворяется. Основные реакции электролиза представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные реакции, протекающие в алюминиевом электролизере

Реакции восстановления и окисления алюминия:	$2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{r}) + 4\text{Al}$	(1)
	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 3\text{CO}_2(\text{r}) + 2\text{Al}$	(1.3)
	$3\text{CO}_2(\text{r}) + 2\text{Al}(\text{p}) \rightarrow 2\text{Al}_2\text{O}_3(\text{p}) + 3\text{CO}(\text{r})$	(1.4)
Добавка AlF_3 в электролит для нейтрализации Na_2O и CaO	$3\text{Na}_2\text{O} + 4\text{AlF}_3 \rightarrow 2\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{Al}_2\text{O}_3$	(1.5)
	$3\text{CaO} + 2\text{AlF}_3 \rightarrow 3\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$	(1.6)
Добавка соды (управление содержанием AlF_3)	$4\text{AlF}_3 + 3\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 3\text{Na}_3\text{AlF}_6 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO}_2$	(1.7)
Анодные реакции углерода: горение на воздухе; реакция Будуара; окисление CO под укрытием	$\text{C} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{r})$	(1.8)
	$\text{CO}_2(\text{g}) + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}(\text{r})$	(1.9)
	$2\text{CO}(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{r})$	(1.10)
Сера в аноде. Сначала на аноде образуется COS при высокой температуре. Затем газ горит под укрытием	$\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{C} + 3\text{S} \rightarrow 2\text{Al} + 3\text{COS}(\text{r})$	(1.11)
	$2\text{COS}(\text{r}) + 3\text{O}_2(\text{r}) \rightarrow 2\text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{SO}_2(\text{r})$	(1.12)
Выделение фторидов из электролита: водой, поступающей из глинозема (1.13), воздуха (1.15) и за счет взаимодействия (1.14)	$2\text{AlF}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{HF}(\text{r})$	(1.13)
	$\text{Na}_3\text{AlF}_6 + 2\text{AlF}_3 \rightarrow 3\text{NaAlF}_4(\text{r})$	(1.14)
	$3\text{NaAlF}_4(\text{r}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{r}) \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_3\text{AlF}_6 + 6\text{HF}(\text{r})$	(1.15)

На угольном аноде происходит реакция окисления углерода выделяющимся в процессе кислородом, образуются угарный и углекислые газы – то есть происходит сгорание подошвы анодов, огарки которых по мере сгорания меняются на новые аноды. В силу непрерывного процесса

электролиза замена анодов производится по установленной схеме и циклу замены, который зависит от качества анодов и грамотного ведения технологического процесса. Суточная скорость сгорания анодов составляет 1,5-1,7 см, что соответствует циклу замены 26-28 суток.

В работе [23] сказано, что повышение температуры расплава на 10°C снижает выход по току на 2 -3 % вследствие увеличения скорости реакции растворения и перехода растворенного алюминия в электролит. Одновременно с этим увеличивается интенсивность циркуляции электролита.

В работе[24] говорится, до какой температуры можно вести процесс электролиза. Низкое КО электролита может привести к снижению температуры, требуется внимательно следить за перегревом. При большом перегреве над температурой ликвидуса ($> 15^{\circ}\text{C}$) начинается плавление настыви и снижается выход по току, при малых перегревах ($< 5^{\circ}\text{C}$) образуются коржи на дне ванны.

Главной причиной снижение выхода по току являются вторичные реакции, при которых, растворенный алюминий и натрий взаимодействует с анодными газами. Одновременно падает и общая скорость растворения алюминия. Снижение общей растворимости алюминия и электронной проводимости при уменьшении КО приводят к возрастанию выхода по току алюминия. Для длительной и успешной эксплуатации электролизера главными факторами являются форма настыви и гарнисажа [25, 26]. Выход по току уменьшается также в случаях отклонений от точной дозировки глинозема, рассчитанной для данного выхода по току [27-29].

Применительно к электролизеру взаимодействие окружающей среды с электролизером заключается в совершении работы (A) над электролизером и в передаче тепла (Q) от электролизера в окружающую среду. Часть работы идет на повышение энтальпии системы. При таком подходе электролизер рассматривается как аппарат, в котором вещества, переходя из одного состояния в другое, повышают энтальпию. Таким образом, уравнение баланса имеет вид:

$$A=Q +\Delta H \quad (2)$$

Под величиной ΔH понимается суммарная величина изменения энтальпии при протекании, как основной реакции, так и обратной реакции взаимодействия алюминия в количестве $(1-\eta)Al$ с углекислым газом.

Тепловой поток через футеровку днища и через верх ванны определяется разницей температур электролита (T_b) и окружающего пространства (T_r) [30]:

$$Q_b = \frac{A_b}{R_b} (T_{bc} - T_{rc}) \quad (3)$$

$$Q_t = \frac{A_t}{R_t} (T_{bath} - T_{room}) \quad (4)$$

где R_b и R_t – термические сопротивления, соответственно, футеровки днища и верха ванны;

A_b и A_t – площади, соответственно, днища кожуха и верха ванны.

Тепловой поток через боковую настель удобно выражать как функцию перегрева ванны ($T_b - T_{liq}$), где температура поверхности настели должна быть равной температуре ликвидуса при данном составе электролита:

$$Q_s = h_{ledge} A_s (T_{ba} - T_{liq}) \quad (5)$$

где h_{ledge} – коэффициент теплопередачи между электролитом/металлом и бортовой настелью;

A_s – площадь настели.

Общие потери тепла из ванны тогда составят:

$$Q_{tot} = Q_b + Q_t + Q_s \quad (6)$$

Таким образом, в стабильном состоянии, общие потери тепла ванной определяются работой, A , которая является произведением силы тока и напряжения на ванне, а теплота зависит от термического сопротивления

элементов футеровки электролизера, теплоотдающих свойств электролита и поверхностей электролизера, толщины бортовой настыли [31].

Тепловой поток через настыль в окружающее пространство равен:

$$Q_s = \frac{A_s}{R_{TOT}} (T_{liq} - T_{room}) = \frac{A}{\frac{z_{ledge}}{k_{ledge}} + R_{lining} + \frac{1}{h_{shell}}} (T_{liq} - T_{room}) \quad (7)$$

где k_{ledge} - теплопроводность бортовой настыли;

R_{lining} – термическое сопротивление футеровки;

h_{shell} – коэффициент теплоотдачи между кожухом и окружающим пространством.

В стационарном состоянии потоки, определяемые уравнениями (5) и (7), должны быть равны, и справедливо следующее выражение для толщины бортовой настыли, z_{ledge} :

$$z_{ledge} = k_{ledge} \left[\frac{T_{liq} - T_{room}}{h_{ledge} (T_{bath} - T_{liq})} - \Sigma R_{lining} - \frac{1}{h_{shell}} \right] \quad (8)$$

Уравнение (7) показывает, что толщина бортовой настыли определяется перегревом, теплосопративлением футеровки, температурой окружающего пространства и коэффициентом теплоотдачи кожуха. Изменение силы тока и поступление энергии влияют на толщину бортовой настыли, а, следовательно, и на защиту бортовых блоков от агрессивной среды-электролита.

Передача тепла от ванны в окружающее пространство осуществляется за счет конвекции и излучения, которые описываются, соответственно, уравнениями (8) и (9):

$$Q_{conv} = Ah (T_{shell} - T_{room}) \quad (9)$$

$$Q_{rad} = A\varepsilon\sigma(T_{shell}^4 - T_{room}^4) \quad (10)$$

где Q_{conv} – конвективный тепловой поток [Вт];

Q_{rad} – тепловой поток излучением [Вт];

h – коэффициент теплоотдачи [Вт/м²·К];

ε – излучательная способность стенки;

σ – константа Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ [Вт/м²·К];

T_{shell} – температура кожуха [К];

T_{room} – температура окружающего воздуха [К];

A – площадь теплоотдающей поверхности катодного кожуха [м²].

Таким образом, общий тепловой поток от ванны в окружающее пространство является суммой потоков, определяемых уравнениями (5) и (6):

$$Q_{tot} = Q_{conv} + Q_{rad} = Ah(T_{shell} - T_{room}) + A\varepsilon\sigma(T_{shell}^4 - T_{room}^4) \quad (11)$$

Уравнение (8) может быть переписано следующим образом:

$$Q_{tot} = Ah_{shell}(T_{shell} - T_{room}) \quad (12)$$

где

$$h_{shell} = Nu * \frac{k}{L} + \varepsilon\sigma(T_{shell}^4 - T_{room}^4)/(T_{shell} - T_{room}) \quad (13)$$

Исходя из вышесказанного, тепловой баланс электролизёра при увеличении силы тока сохраняется за счёт:

- 1) снижения толщины бортовой настыли, повышения температуры борта;
- 2) изменения состава электролита – увеличение температуры перегрева и увеличение коэффициента теплопередачи эл-т/металл - настыль;
- 3) снижения прихода тепла путём уменьшения междуполюсного расстояния (МПР), теплоотдача остается прежней.

Снижение толщины настыли приводит к повышению тепловой и агрессивной нагрузки на борта электролизера, снижает энергетическую эффективность работы электролизера.

Уменьшение МПР приводит к снижению выхода по току и магнитогидродинамической (МГД) стабильности электролизера.

Тепловой баланс

При определённом рабочем напряжении, температуре электролита, толщине настыли и ФРП, в электролизёре устанавливается тепловой баланс, то есть приход тепла равен его расходу.

Толщина бортов электролизёра рассчитывается таким образом, чтобы на них намерзал электролит.

Настыль - слой застывшего электролита на бортах электролизной ванны в зоне металла.

Гарниссаж - слой застывшего электролита на бортах электролизной ванны в зоне электролита.

ФРП - конфигурация застывшего электролита (гарниссажа и настыли), осадков и коржей в объеме катода электролизной ванны. То есть то, что есть у нас на бортах и подине.

Уравнение теплового баланса может быть записано в виде:

$$Q_{эл} + Q_{ан} = Q_{разл} + Q_{мет} + Q_{газ} + Q_{окр} \quad (14)$$

где $Q_{эл}$ – приход тепла от прохождения электрического тока;

$Q_{ан}$ – приход тепла от сгорания углерода анода;

$Q_{разл}$ – расход тепла на разложение глинозёма и другие электрохимические реакции;

$Q_{мет}$ – тепло, удаляемое с выливаемым металлом;

$Q_{газ}$ – тепло, удаляемое с отходящими газами;

$Q_{окр}$ – потери тепла в окружающее пространство.

Электрический баланс электролизёра.

Ванна представляет собой цепь последовательно соединённых проводников по схеме: анодная ошиновка → анод → электролит → расплавленный алюминий → подина → катодная ошиновка. Каждый из этих проводников имеет своё сопротивление, которое приводит к падению напряжения при прохождении по нему тока. В сумме эти падения составляют рабочее напряжение электролизёра

$$U_p = E + \Delta U_{эл} + \Delta U_A + \Delta U_K + \Delta U_{ош} \quad (15)$$

где E – обратная ЭДС;

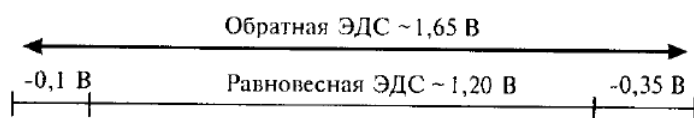
$\Delta U_{эл}$ - падение напряжения в электролите;

ΔU_A – падение напряжения в аноде;

ΔU_K – падение напряжения в катоде;

$\Delta U_{ош}$ – падение напряжения в ошиновке электролизёра.

Обратная ЭДС представляет собой сумму напряжения разложения глинозёма, анодного и катодного перенапряжений.



Анодное перенапряжение – это потери напряжения на анодные реакции и выделение анодных газов. Оно составляет 0,3-0,4В, что в общем балансе напряжения является заметной величиной.

Катодное перенапряжение – это потери напряжения на катодные реакции. Оно составляет около 0,1В.

Напряжение анодных эффектов не входит в рабочее напряжение, так как кратковременные повышения напряжения проще учитывать по серии в целом.

Расчёт энергетических показателей серии и отдельных бригад ведут по **среднему напряжению**, которое определяет средний расход электроэнергии при производстве алюминия.

$$U_{\text{ср}} = E + \Delta U_{\text{эл}} + \Delta U_{\text{а}} + \Delta U_{\text{к}} + \Delta U_{\text{ош}} + \Delta U_{\text{аэ}} + \Delta U_{\text{с}} \quad (16)$$

где $\Delta U_{\text{аэ}}$ – повышение напряжения за счёт анодных эффектов;

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

Таблица 3 - Составляющие напряжения на ванне, В

Составляющие напряжения на ванне	Обозначение	В
Обратная ЭДС	E	1,65
Потери напряжения:		
в аноде	$\Delta U_{\text{а}}$	0,3
в электролите	$\Delta U_{\text{эл}}$	1,6
в катоде	$\Delta U_{\text{аэ}}$	0,45
от анодных эффектов	$\Delta U_{\text{аэ}}$	0,03
в ошиновке электролизёра	$\Delta U_{\text{ош}}$	0,310
в ошиновке серии	$\Delta U_{\text{с}}$	0,05
Рабочее напряжение	$U_{\text{р}}$	4,360
Среднее напряжение	$U_{\text{ср}}$	4,390

1.3 Конструкции электролизеров

Алюминиевый электролизер включает в себя следующие основные подсистемы: Катодное устройство, анодное устройство, ошиновку, опорные металлоконструкции, систему газоулавливания, подсистему металл, подсистему электролит, систему АПГ.

Мы часто произносим или слышим такие фразы: «больной электролизер», «молодой электролизер», «старый электролизер» не задумываясь о глубинной сути, заложенной в этих словосочетаниях. Но если мы посмотрим на электролизер как на сложную систему, состоящую из множества подсистем, которые, взаимодействуя друг с другом на границах разделов, вызывают изменения свойств этих подсистем, то мы обнаружим

справедливость уподобления электролизера сложной самоорганизующейся системе или организму. Так электролизер имеет момент рождения и смерти, достигает в определенный период своего расцвета – наивысшей производительности, подвержен различным отклонениям – болезням и, наконец, как самоорганизующаяся система имеет определенный запас устойчивости.

Состав подсистем:

1. Анод:

- 1.1 Обожженный анод (ОА);
- 1.2 Штанга, траверса, биметаллическая вставка;
- 1.3 Механизм подъема/опускания анодного массива;
- 1.4 Укрывной материал анодного массива.

2. Катод:

- 2.1 Подовые блоки;
- 2.2 Подовая масса;
- 2.3 Огнеупоры;
- 2.4 Теплоизоляция;
- 2.5 Компенсация;
- 2.6 Блюмсы;
- 2.7 Материал соединения блюмс-блок;
- 2.8 Подушка;
- 2.9 Бровка;
- 2.10 Кожух;
- 2.11 Бортовые блоки

3. Электролит:

- 3.1 МПР;
- 3.2 Пространство борт-анод;
- 3.3 Настыль;
- 3.4 Корка + глинозем;
- 3.5 Осадок +коржи;

4. Металл:

4.6 Уровень;

4.7 Сортность;

4.8 ФРП;

4.9 Поля – температурное, электрическое, магнитное

Конечно, такое разделение носит условный характер, не все подсистемы перечислены, каждая из подсистем имеет внутри себя еще не одно вложение.

В соответствии с принятой классификацией электролизеры делятся по следующим признакам [35]:

- по анодному устройству - с одним непрерывным самообжигающимся анодом (СА) и обожженными анодами (ОА);
- кожух катодного устройства может быть с днищем и без днища.

Патент на непрерывный самообжигающийся электрод был получен Содербергом, принцип устройства таких электродов заключается в использовании тепла электролиза для обжига анодной массы. ОА предварительно обожжены в печах, в их состав входит смесь кокса и пекового связующего с добавлением переработанных огарков. Электролизеры СА в зависимости от способа подвода тока к аноду подразделяются на электролизеры с верхним (ВТ) и боковым токоподводом (БТ).

Недостаток электролизёров с самообжигающимися анодами (СА) заключается в том, что им свойственен повышенный расход электроэнергии, высокие трудозатраты, тяжелые условия труда и более высокие уровни выбросов загрязняющих веществ (обжиг анодов происходит непосредственно в корпусах электролиза, поэтому в атмосферу попадает значительное количество вредных смол и газов). Наиболее вредными из которых являются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [36]. На электролизерах (СА) ограничена возможность получения алюминия

высших сортов из-за поступления значительного количества железа при коррозии стальных штырей и газосборных секций.

Электролизёры с (ОА) лишены этих недостатков. Преимущества электролизеров с ОА:

- улавливание и очистка выделившихся анодных газов производится с большей эффективностью,
- больше возможностей получить алюминий высших сортов;
- ниже частота анодных эффектов;
- возможность снижения удельного расхода электроэнергии;
- уменьшение расхода углерода;
- возможность получить значительно более высокий выход по току (до 96%);
- аноды на ваннах ОА утепляют, засыпая их укрывным материалом (смесь дроблёной электролитной корки и глинозёма). По этим причинам с 70-х годов прошлого столетия новое строительство и реконструкции алюминиевых предприятий ведётся по пути внедрения более мощных электролизёров с ОА.

Схема ванны: с предварительно обожженным анодом (ОА) представлены на рис.1.

1.3.1 Катодное устройство

Катод алюминиевого электролизера – угольный сосуд, имеющий форму подноса. Сборка катода не изменилась более чем за сто лет. Однако нынешняя конструкция промышленной подины ушла далеко от той, которая применялась в 1890-е гг. и основывалась на обычной смеси пека и кокса-наполнителя. Современная конструкция катода является результатом использования высоких технологий и знаний в области материаловедения и конструирования. Катоды рассчитаны на срок службы не менее 10 лет, который в значительной степени зависит от методов обжига, пуска, технологии и качества обслуживания электролизера и реально составляет

3,5-4,5 года. В таблице 4. приведены данные о том, как изменялся материал угольного катода.

Для промышленной ванны слово «катод» используется при обозначении контейнера, содержащего расплавленный металл и электролит (рис.2). Под катодом понимается система, включающая электрически проводящую угольную подину с блоками, проводящими ток, огнеупоры и изоляцию, которые размещаются в усиленном стальном кожухе.

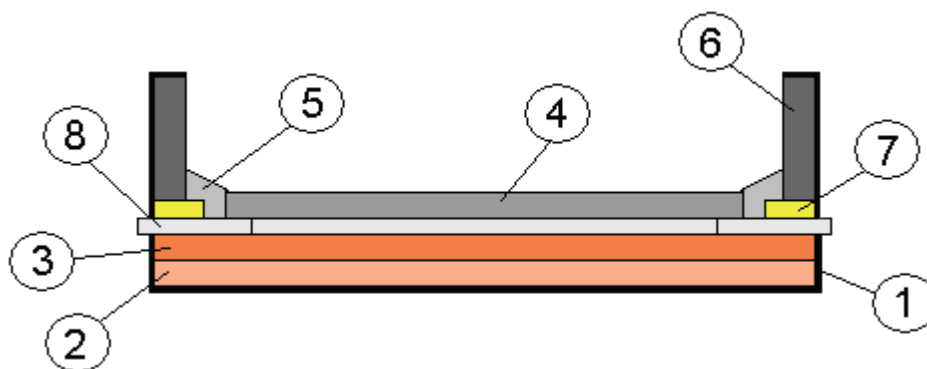


Рисунок 2 - Схема катодного устройства

1 – стальной кожух; 2 – теплоизоляция; 3 – огнеупорная футеровка; 4 – угольная подина; 5 – подовая масса; 6 – бортовые блоки; 7 – бровка; 8 – катодные стержни

В новых конструкциях ванн бортовые блоки изготавливаются из карбидокремниевых плит. При рабочей температуре теплопроводность борта из SiC примерно в дваниже теплопроводности графитового блока, следовательно, борт из SiC может иметь толщину в два раза меньше и обладать таким же теплосопротивлением. Освободившееся пространство следует занять большими анодами, что позволит повысить нагрузку и увеличить производство металла. Блоки устанавливаются на кирпичную или бетонную бровку.

Таблица 4 - Эволюция катодных угольных материалов

	Материал-наполнитель	электросопротивление, МКОМ	расширение по Рапопортк, %	теплопроводность, Вт/М× К
Прошлые	Металлургический кокс(МК)	700-80	около 5	2,5-3
	Нефтяной кокс	55-65	около 7	4-4,5
	Пековый кокс	60-70	около 7	3-4
	Антрацит	60-70	около 2,5	3-3,5
	Смеси МК+ГКА	60-70	около 1,5	3,5-4
	Антрацит, кальцинированный в электропечах (ЭКА)	50-60	около 1,1	5-6
Настоящее	Антрацит, кальцинированный на 100% в электропечах (ЭКА)	45-55	0,9-1,1	6-7
	ЭКА + электрографит (Г) до 50%	25-40	0,3-0,8	8-20
	Полуграфит (обоженный)	16-20	0,2-0,3	24-36
	100% электрографит (Г) (графитизированный)	10-13	0,05-0,09	80-110
Будущее	ЭКА + электрографит (Г)	35-40	0,3-0,8	8-15
	100% электрографит (Г)	10-12	0,05-0,09	80-110
	ЭКА + графит + жаропрочные металлы	1-5	≤0,05	—
	Тугоплавкие материалы (TiB ₂ , TiC, ZrC и др.)	0,1-0,6	0	18-25

Бортовые блоки обладают низкой электропроводностью и высокой теплопроводностью для создания надёжной бортовой настыли. Это вызвано тем, что замерзший электролит является единственным существующим материалом, способным выдерживать совместное воздействие электролита и

метала. Поэтому, конструкция боковой футеровки создается для обеспечения высокого потока тепла.

Характеристики карбида кремния, позволяющие использовать его в качестве бортовой части электролизера:

- Высокое сопротивление окислению;
- Устойчивость к расплавленному криолиту;
- Высокая теплопроводность;
- Высокое сопротивление истиранию;
- Высокая электросопротивляемость.

В качестве материалов стен в условиях, подобных промышленным, были предложены и испытаны керамические огнеупоры, содержащие практически чистый оксинитрид или нитрид кремния.

В катодном устройстве утеплена подина, чтобы не допускать образования плохо проводящих ток солевых слоев, и разутеплены борта, чтобы создать гарнисаж и настель и тем самым защитить бортовую футеровку от воздействия электролита. катодное устройство должно противостоять разрушению отдельных его частей, для того чтобы не допустить досрочного выведения электролизера в капитальный ремонт из-за проникновения расплава в набивные швы и под угольную футеровку, локального или полного износа бортовой футеровки, деформации катодного кожуха

Важнейшей энергетической характеристикой, связанной с удельным расходом электроэнергии электролизером является сопротивление подины [37]. Падение напряжения в подине [38] составляет 250 - 600 мВ, 250 - 450 мВ - по данным работы [30].

Катодный кожух может иметь два варианта исполнения, а именно, контрфосного или шпангоутного типа.

Жёсткость конструкции катодного кожуха шпангоутного типа обеспечивается системой шпангоутов, напоминающих рёбра остова морских судов. Шпангоуты имеют большой момент сопротивления распирающим усилиям. Шпангоуты установлены с шагом, равным ширине подового блока. [33].

Катодный кожух контрфорсного типа:

В процессе эксплуатации угольная подина пропитывается фтористыми солями и постоянно увеличивается в размерах, разбухает. Возникают большие боковые усилия на стенки металлического кожуха. Если в торцах конструкция более жёсткая, то на бортах возникает риск значительной деформации и отключения электролизёра в капитальный ремонт. Чтобы этого не происходило, используют контрфорсы – мощные рёбра жёсткости.

Контрфорсы крепятся к днищу кожуха шпильками диаметром 85мм, которые играют роль шарниров. Верхняя часть контрфорса плотно без зазоров притягивается к наружной стенке кожуха, а нижняя упирается в бетонную распорную балку, на которую через контрфорс передаются боковые усилия. То есть бетонная распорная балка не даёт кожуху «развалиться».

Контрфорсы - это вертикальные стойки, стянутые поперек электролизера на уровне днища стальными тягами. Верхние концы контрфорсов удерживают кожух электролизера от распирающих усилий в подине, а нижние концы противоположных контрфорсов опираются попарно на железобетонные балки. Балки «работают» на сжатие, а стягивающие стальные тяги выполняют роль - нулевой точки рычага.

1.3.2. Анодное устройство

Проводником тока в межполюсное пространство для осуществления электролиза является предварительно обожженный угольный анод. Анодное устройство (рис.3) состоит из угольного анода, подъемного механизма,

служащего для перемещения анода, ошиновки, штырей и опорной конструкции.

Анод имеет следующий размер 1450×710×625. Смонтированный анод состоит из анодного блока и анододержателя, соединённых чугуновой заливкой. Анододержатель состоит из алюминиевой анодной штанги и стального кронштейна с тремя ниппелями диаметром 180 мм.

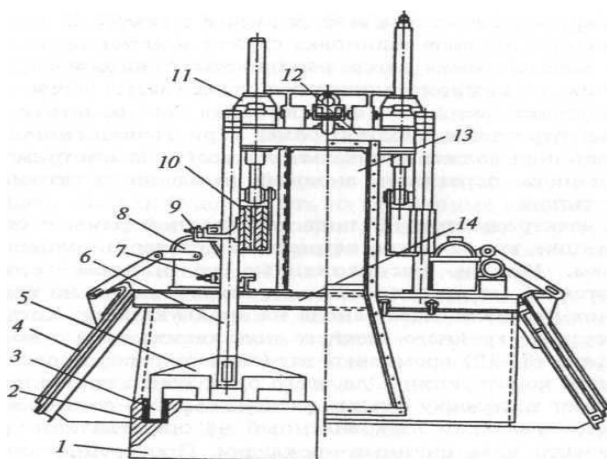


Рисунок 3 - Анодное устройство электролизера ОА

1 - анодный блок; 2 - заливка ниппеля; 3 - ниппель; 4 - крышка укрытия;
5 - траверса; 6 - штанга; 7 - временный зажим; 8 - механизм подъема укрытия; 9 - основной зажим; 10 - анодная шина; 11 - механизм подъема анодного массива; 12 - анодная рама; 13 - короб газоотсоса; 14 – поперечные балки.

Стальной анододержатель и алюминиевая штанга соединены при помощи стале-алюминиевой вставки, которая представляет собой две металлические пластины – стальную и алюминиевую, соединённые между собой сваркой взрывом.

Глубина и диаметр гнезда в блоке имеет большое значение, так как от неё зависит электросопротивление в контакте ниппель-блок и высота огарка. Её глубина составляет 130 мм, а диаметр 215 мм.

При электролизе ОА расходуется, в результате чего, образуются огарки, масса которых достигает 15 % от массы нового анода. Огарки

перерабатывают, затем пускают в производство новых анодов. В практике применяют два понятия расхода ОА:

Чистый (нетто) расход анодов:

Контрольный показатель в мире: 400 кгС/тА1

Худший показатель: 500 кгС/тА1

Расчетный средний показатель: 420 кгС/тА1

Расход анодов брутто:

Контрольный показатель в мире: 500 кгС/тА1

Худший показатель: 600 кгС/тА1

Расчетный средний показатель: 550 кгС/тА1

Схематично расход ОА показан на рис. 4.

В анодное устройство электролизера с ОА входят два ряда анодных блоков. Общее количество блоков зависит от силы и плотности тока и может достигать 40 шт. Расстояние между рядами блоков составляет 150-250 мм, а между блоками в одном ряду 40-60 мм. Установленные аноды утепляют, засыпая их смесью глинозема и дробленой электролита.

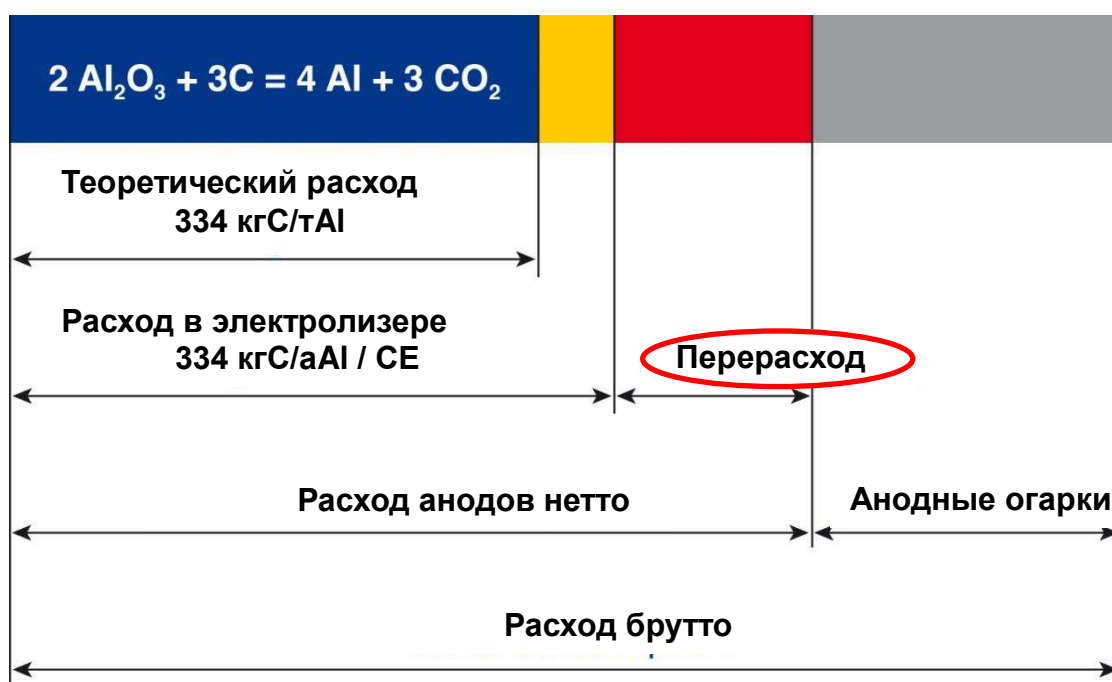


Рисунок 4 - Расход ОА нетто и брутто

Анодный массив электролизера защищен слоем глинозема и дробленной корки электролита, что защищает его от окисления, поддерживает тепловой баланс и целевой уровень электролита, обеспечивает оптимальную форму настыва и гарнисажа [39,40].

Состав массы ОА:

- кокс 65 %;
- пек 15%;
- переработанные огарки 20%.

Загрузка глинозема осуществляется системой АПГ через отверстия в центральном канале

При сгорании анодного массива рама перемещается вниз до крайнего нижнего положения, по достижении которого должна быть поднята вверх (перетяжка анодной рамы). При выполнении этой операции анодный массив должен оставаться на месте. Специальное приспособление, называемое «пауком» устанавливается на электролизер. Захваты паука фиксируются на штангах анодов, тем самым удерживая аноды от падения. Откручивают замки, прижимающие штанги анодов к ошиновки и включается перетяжка. После чего, замки закручивают, а «паука» снимают.

1.3.3 Системы газоулавливания

Для электролизеров ОА применяются створчатые укрытия изготовленные из алюминиевого листа. По сборному коробу, расположенному по продольной оси электролизера, газы отсасываются в балку-коллектор и оттуда направляются на очистку. Часть газов попадает в рабочую зону, ухудшая условия труда в корпусе. Для отведения газов из рабочего пространства и выделяющегося тепла в корпусах электролиза предусмотрена вентиляция. Подаваемый в корпус воздух через рифленчатый пол, разбавляет не уловленную часть анодных газообразных соединений, которые удаляется через фонарь в окружающую среду и частично засасывается в систему газоочистки.

1.3.4 Ошиновка электролизеров

Важнейшим, элементом в конструкции всего агрегата является ошиновка [41]. При протекании тока по проводнику вокруг него возникает магнитное поле. В алюминиевых электролизерах электромагнитные силы, воздействуя на жидкий алюминий, находящийся на подине, приводят к перекосу поверхности металла, возникновению циркуляции расплава, подмыканию анода и, как следствие, снижению выхода по току.

Если в магнитное поле внести какое либо тело, то вектор магнитного поля в нем носит название магнитной индукции B , значение которой определяется выражением

$$B = H \cdot \mu = I \cdot \mu / 2 \cdot \pi \cdot r \quad (17)$$

где μ - константа магнитной проницаемости для данного тела;

I - сила тока;

r - расстояние от проводника до данной точки поля.

Для расплавленного алюминия магнитная проницаемость практически равна единице и поэтому формула принимает вид

$$B = I / 2 \cdot \pi \cdot r \quad (18)$$

Единицей измерения магнитной индукции B в системе СИ является тесла [Тл]

При взаимодействии тока с индуктированным им магнитным полем, создаваемым этим током, в расплаве возникает электромагнитная сила F , величина которой определяется выражением

$$F = 0,1 (i B) = 0,1 (i H), \quad (19)$$

где F - электромагнитная сила, действующая на 1 см³ расплава, Н/см³;

i - плотность тока в расплаве, А/см²;

H - напряженность магнитного поля, А/м².

Электромагнитная сила возникает в любой точке электролизера, но наибольший интерес представляет ее значение в расплаве, т.к. под ее воздействием изменяется форма поверхности металла, возникает циркуляция расплава и т.д. Электромагнитная сила, действующая на расплав,

перпендикулярна и к направлению тока, и к направлению магнитного поля [6,11,29].

Поступающий на кремниевую преобразовательную подстанцию (КПП) переменный ток преобразуется в постоянный и по шинпроводам подается на серию электролизеров. Ошиновка электролизера предназначена для подвода (анодная) и отвода (катодная) тока. Катодная ошиновка неподвижна и монтируется в шинных каналах или на ригелях с обеих сторон ванны. Так как анод перемещается, то подвод тока к нему осуществляется гибкими пакетами шин. На электролизерах ОА анодная ошиновка смонтирована на анодной раме, которая перемещается вместе с анодом, поэтому ток к анодной ошиновке подается по гибким пакетам шин.

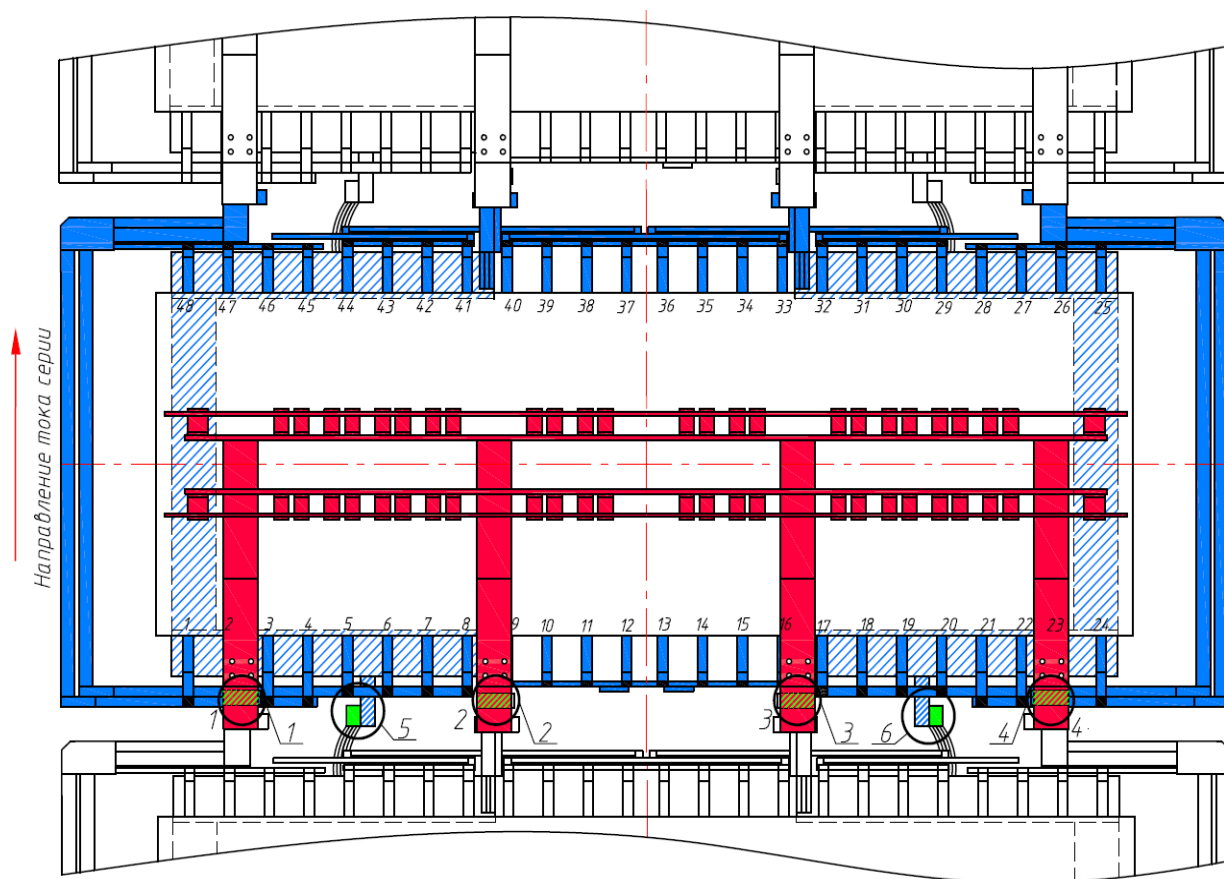


Рисунок 5 - Ошиновка электролизёров С-255

Во избежание дополнительных потерь энергии, большинство контактов на ошиновке выполняют сваркой, либо болтовым соединением, поскольку при прохождении тока по шинам в них требуется работа диссипации, пропорциональная сопротивлению шин. Для снижения потерь

энергии сечение шин надо увеличивать, но это приводит к дополнительным затратам на монтаж ошиновки. На современных сверхмощных электролизерах ошиновка является сложной инженерной конструкцией, масса которой достигает 150 кг/кА [6].

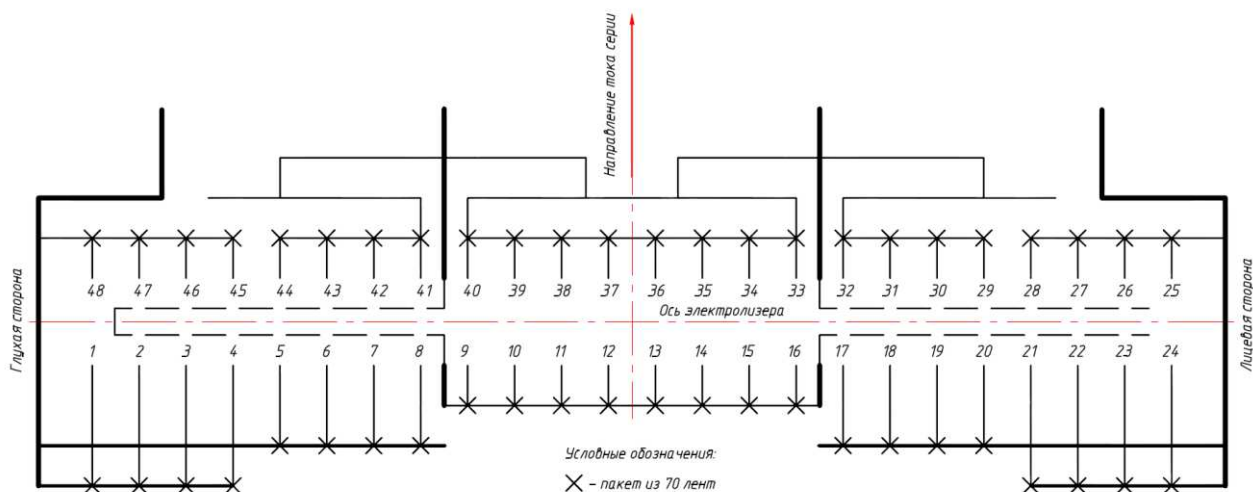


Рисунок 6 - Схема приварки катодных спусков электролизёров С-255

При расчете ее сечения выбирается такая плотность тока, при которой сумма затрат потерь энергии и стоимости ошиновки будет минимальна. Такую плотность тока, т.е. силу тока, приходящуюся на 1 мм² (А/мм²), называют экономически выгодной. Сила тока на электролизерах достигает 600 кА, а экономически выгодная плотность тока в ошиновке, как правило, не превышает 0,25-0,3 А/мм²[6,42].

Требования, предъявляемые к ошиновке:

- К электролизеру должен быть двусторонний подвод тока. Анодная ошиновка асимметрична относительно продольной и поперечной осей электролизера с целью компенсации отрицательного влияния магнитных полей;
- Ошиновке должна иметь оптимальную плотность тока;
- Возможность быстрого отключения и подключения электролизера в электрическую цепь без нарушений работы остальных ванн;

- Обеспечение стабильной формы поверхности расплавленного металла на подине, близкой горизонтальной.

1.3.5 Подсистема электролит

Основным компонентом электролита – среды, в которой идет электролиз, является криолит Na_3AlF_6 (двойная соль $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$). Несмотря на многолетние усилия исследователей найти какой-либо подходящей замены криолиту не удалось.

Основные функции электролита:

- растворяет глинозем с образованием ионов, пригодных для электролитического разложения;
- является проводником электрического тока от анода к катоду;
- генерирует тепло;
- разделяет произведенный на катоде алюминий и выделившийся на аноде CO_2 .

Свойства криолита:

- является относительно хорошим растворителем для глинозёма;
- имеет более высокое напряжение разложения, чем оксид алюминия;
- имеет в расплавленном состоянии хорошую электропроводность;
- имеет приемлемую температуру плавления;
- не реагирует в сколь-либо заметной степени с алюминием и углеродом;
- образует достаточно жидкий расплав;
- плотность в расплавленном состоянии ниже, чем плотность жидкого алюминия;

Наплавления уровня электролита в чистом виде технический криолит практически не применяется, а используют, в основном, оборотный электролит (оборот). Оборот – это изъятый ранее и застывший электролит.

Иногда используют флотационный электролит (флотацию), который привозят с других предприятий. В нём контролируют содержание фтора, натрия, серы, углерода и влаги. Для корректировки состава электролита в

качестве добавок используют и другие фтористые соли. Прежде всего, фторид алюминия, фторид кальция и кальцинированную соду (Na_2CO_3).

К составу электролита предъявляется целый ряд обязательных требований:

- растворение необходимого количества глинозёма;
- относительно невысокая температура ликвидуса;
- минимальные потери при разложении и испарении;
- электролит не должен пропитывать и разрушать в заметной степени футеровку электролизёра.

В последнее время в мировой алюминиевой промышленности прослеживается тенденция по использованию все более кислых электролитов, вплоть до значений К.О. 2.2 и ниже. Технологически развитые предприятия Запада, давно сделали выбор в пользу работы на кислых либо на литиевых электролитах (содержание LiF до 4%). Использование фторида лития ограничивается его высокой ценой, а также тем, что требуются дополнительные затраты на оборудование для очистки металла. Для уменьшения температуры ликвидуса и перегрева электролита в качестве добавки может выступать (при определенных ограничениях, накладываемых на его концентрацию) CaF_2 . Использование при электролизе любой добавки к криолиту лимитируется балансом положительных и отрицательных изменений, к которым приводит его использование. Следует также учесть, что идеальной добавки, положительно влияющей на все свойства электролита, не существует [43-48].

Предприятие АО «РУСАЛ Саяногорск» работает на кислых электролитах, поддерживая КО в пределах 2,2-2,3. В процессе эксплуатации электролизёра КО постоянно растёт из-за потерь фторида алюминия. Основные механизмы потерь фтористого алюминия:

- испарение (AlF_3 обладает высокой летучестью (возгоняется));
- взаимодействие AlF_3 с влагой;
- потери во время анодных эффектов.

Поэтому, работа на низких КО требует постоянной корректировки состава электролита (загрузки фторида алюминия). Современные электролизёры работают с избытком AlF_3 , то есть на кислых электролитах. Это позволяет улучшить целый ряд его свойств.

Прежде всего, низкое КО снижает растворимость алюминия в электролите, что способствует существенному повышению выхода по току. Изменением содержания AlF_3 можно в широких пределах менять температуру ликвидуса электролита (таблица 5). Если температура плавления чистого криолита равна $1010^{\circ}C$, то за счёт снижения КО до 2,2-2,3 это значение удаётся снизить до $930-945^{\circ}C$, а электролиз вести при температуре $950-955^{\circ}C$. Если удаётся вести электролиз с перегревом электролита относительно температуры плавления на $8-10^{\circ}C$, то это даёт ощутимое повышение выхода по току.

Таблица 5-Температура ликвидуса электролита в зависимости от КО

КО	Температура ликвидуса, $^{\circ}C$ (содержание глинозема 2%)
2,8-2,6	975-970
2,6-2,4	970-965
2,4-2,3	965-960
2,3-2,2	960-950
2,2-2,1	950-940

При снижении КО, снижается и плотность электролита, он становится легче. Плотность жидкого металла составляет около $2,3г/см^3$, а чистого криолита с КО=3 примерно $2,1г/см^3$. Разница в удельных весах при этом составляет $0,2г/см^3$. Со снижением КО до 2,2 разница возрастает уже до $0,26г/см^3$. Однако при снижении температуры процесса в кислых электролитах снижается как растворимость, так и скорость растворения глинозёма. Образуется больше осадков и коржей, но использование систем

АПГ заметно уменьшает это влияние. Основная задача – поддерживать стабильное КО и содержание добавок.

Таблица 6 - Влияние добавок и температуры на свойства расплавленных солей

переменная	уровень	Раст. глины, % масс	Темп.ликв., °С	Раст. металла, % масс.	κ,	ρ,	Р,	σ,	η,
					Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	г/см ³	Па	мН/м	мПа·с
Криолит	100%	12,4	1011	0,131	2,874	2,103	534	131,5	2,323
CaF ₂	4%	-1,5	-12	-0,013	-0,057	0,018	-2	0,3	0,13
	7%	-2,5	-20	-0,022	-0,099	0,033	-3	-2,6	0,228
AlF ₃	4%	-0,4	-1	-0,033	-0,171	-0,025	137	-4	-0,091
	12%	-1,4	-24	-0,078	-0,439	-0,06	596	-12,3	-0,399
LiF	1%	-0,5	-9	-0,018	0,047	-0,005	-11	...	-0,123
	3%	-1,3	-27	-0,021	0,142	-0,014	-33	...	-0,399
MgF ₂	1%	-0,5	-5	-0,004	-0,047	0,005	-10	...	0,041
	3%	-1,4	-15	-0,012	-0,139	1,013	-11	...	0,123
Al ₂ O ₃	3%		-16	-0,003	-0,145	-0,022	-90	-18,7	0,029
	5%		-28	-0,005	-0,282	-0,04	-130	-36,6	0,118
температура	-25 С	-1,5		-0,04	-0,09	0,023	-165	3,5	0,195
	-50 С	-2,8		-0,082	-0,182	0,047	-282	7	0,398

1.3.6 Система АПГ

Система автоматическая подача глинозёма (АПГ) предназначена для автоматической подачи глинозёма в электролит определенными дозами, тем самым обеспечивая непрерывность процесса. К бункерам, установленным на электролизере, глинозем подается по трубам системой ЦРГ (централизованная раздача глинозёма). В корпусах, где отсутствует ЦРГ, загрузка бункеров АПГ осуществляется технологическими кранами либо напольной техникой.

Применение систем АПГ точечного типа:

- способствует снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;
- стабилизирует тепловой режим;

- обеспечивает концентрацию глинозема в электролите в пределах 2 – 3%;
- минимизирует количество нерастворенного глинозема;
- увеличивает производительность электролизёров;
- снижает трудозатраты персонала;
- повышает выход по току.

Глинозем порциями подается в центральный канал. Сначала срабатывает пневмоцилиндр пробойника – в междурадьё пробивается корка электролита. Затем срабатывает пневмоцилиндр дозатора – в расплав подаётся доза глинозёма. Схема устройства представлена на рис.5.

Сама доза не меняется, изменяется только частота срабатывания. Чем чаще срабатывает АПГ, тем выше концентрация глинозёма в электролите и наоборот.

По такому же принципу работает система АПФС (автоматическая подача фтористых солей), которая обеспечивает поддержание состава электролита в автоматическом режиме. Технические характеристики АПГ АО «РУСАЛ Саяногорск» показаны в таблице 7.

Система АПГ состоит из следующих узлов:

- бункеры для глинозёма и фторида алюминия;
- пробойники с пневмоцилиндрами;
- дозаторы с пневмоцилиндрами;
- влагоотделяющий фильтр;

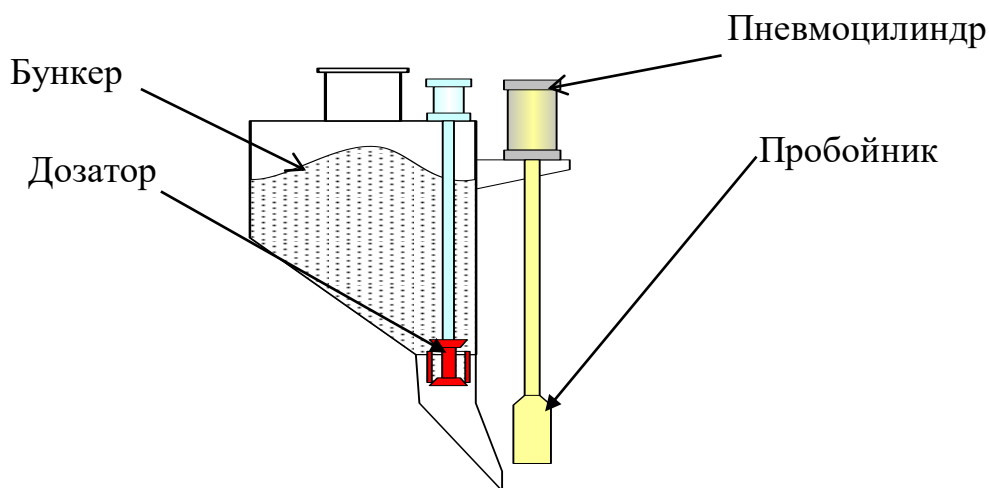


Рисунок 7 - Схема АПГ электролизера ОА

Таблица 7-Технические характеристики АПГ.

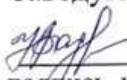
Параметры, ед.изм.	С-175	С-190	С-255 5-6 корпус	С-255 7-8 корпус
Количество больших секций АПГ, шт	2	2	2	3
Количество малых секций АПГ, шт	-	2	-	-
Вместимость бункера для Al_2O_3 , м ³	1,0	1,2	1,8	1,0
Вместимость дозатора, см ³	600	600	1300	1300
Вместимость бункера для AlF_3 , м ³	0,35	0,6	0,6	0,33
Количество пробойников, шт	4	6	4	6
Количество дозаторов, шт	5 (4- Al_2O_3 + 1- AlF_3)	7 (6- Al_2O_3 + 1- AlF_3)	5 (4- Al_2O_3 + 1- AlF_3)	7 (6- Al_2O_3 + 1- AlF_3)

[Изъято 37 страниц]

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт цветных металлов и материаловедения
Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Н.В. Белоусова
подпись, инициалы, фамилия

« 07 » 07 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование возможности повышения тока и улучшения ТЭП на
электролизерах С-255

Направление 22.04.02 «Металлургия»

Программа 22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

Научный руководитель _____

 10.06.20 профессор, д-р хим. наук.
подпись, дата должность, ученая степень

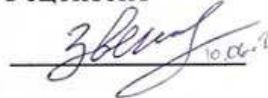
П.В. Поляков
инициалы, фамилия

Выпускник

 10.06.20
подпись, дата


П.А. Панин
инициалы, фамилия

Рецензент

 10.06.20 Инженер-технолог участка управления
подпись, дата технологией в корпусах электролиза
АО «РУСАЛ Саяногорск»
должность, ученая степень

Д.В. Звягинцев
инициалы, фамилия

Консультанты

 10.06.20 канд. эконом. наук, доцент
подпись, дата должность, ученая степень

Т.В. Твердохлебова
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

 07.07.20 профессор, д-р хим. наук.
подпись, дата должность, ученая степень

Н.В. Белоусова
инициалы, фамилия

Красноярск 2020