

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

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель магистерской  
программы

\_\_\_\_\_ Н.В. Белоусова  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Магистерская диссертация**

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»  
код и наименование магистерской программы

Снижение удельного расхода электроэнергии при производстве  
алюминия  
тема

Научный Руководитель	_____	<u>к.т.н., доцент</u>	<u>А.И. Рюмин</u>
	подпись, дата	должность, уч. степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>Е.Н. Побежимов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
		<u>Старший мастер СК№3</u>	
Рецензент	_____	<u>ПАО «РУСАЛ Братск»</u>	<u>А.Э.Овчинников</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Консультант экономического

раздела \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент Т.В. Твердохлебова  
подпись, дата                      должность, уч. степень                      инициалы, фамилия

Красноярск 2020

## АННОТАЦИЯ

Тема магистерской диссертации - «Снижение удельного расхода электроэнергии при производстве алюминия». Диссертация представлена в объеме 71 страниц, включает в себя 13 таблиц, 30 иллюстрации, 24 формул, а также список использованной литературы, состоящий из 51 источников.

Ключевые слова: АЛЮМИНИЙ, АНОДНОЕ УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА, КАТОДЫ С РЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, КАТОДНОЕ УСТРОЙСТВО, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР СОДЕРБЕРГА.

Целью работы является снижение удельного расхода электроэнергии при производстве алюминия с применением рельефных подин катода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести литературный обзор по обозначенной теме;
- обосновать при помощи технологического расчета процесс электролиза алюминия с применением рельефной подины в электролизере Содерберга;
- сделать выводы по экономической эффективности.

Основные выводы и результаты исследования:

Катодное устройство электролизера является наиболее ответственным за повышение производительности процесса электролиза и увеличение выхода по току.

Профильная поверхность катода действует как ограничитель волнового движения слоя металла, и позволяет в несколько раз снизить влияние магнитогидродинамических сил, флуктуацию расплава и значительно уменьшить МПР, как следствие, расход электроэнергии.

Предлагаемое направление модернизации катодного устройства, связанное с применением рельефной подины, принципиально возможно и будет иметь коэффициент сравнительной экономической эффективности  $E_{ср} = 39,10$ .

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1 Литературный обзор.....	8
1.1 Обзор существующих технологий .....	14
1.2 Снижение расхода электроэнергии на заводах России и за рубежом .....	21
1.3 Влияние МГД на работу электролизёра и ТЭП.....	32
2 Энергосбережение на Братском алюминиевом заводе .	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3 Катоды с рельефной поверхностью. Выбор материала и конструкции.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.1 Выбор материалов для электролизера.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4 Техничко-экономическая оценка по снижению расхода электроэнергии на электролизёрах Содерберг	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Заключение .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Список использованных источников .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>



## Введение

Последнее время в ведущих странах мира возникла проблема истощения запасов невозобновляемых энергоресурсов. В связи с этим повысились цены на энергоносители.

По происхождению энергетические ресурсы делятся на топливо различных видов (как возобновляемое, так и нет), энергию различных природных процессов, и ядерную энергию. Также выделяется специальная категория вторичных энергетических ресурсов (топливных, тепловых, и ВЭР избыточного давления). Человеком используются самые разные виды энергии: тепловая, электрическая, ядерная, химическая, механическая. Энергетические ресурсы используются в первую очередь для генерации электроэнергии и в топливной промышленности.

Вследствие этого государственная политика России направлена на содействие новым разработкам эффективных технологий в области энерго- и ресурсосбережения.

Следствием такого подхода на государственном уровне являлась необходимость искать способы снижения энергоемкости своей продукции и устанавливать технические решения, которые направлены на сокращение потребления энергоресурсов.

Производство первичного алюминия по причине большой его энергоемкости сфокусировано на снижении расхода электроэнергии.

Главными направлениями по снижению расхода электроэнергии в данной области можно назвать: уменьшение электросопротивления электролита посредством снижения анодной плотности тока и межполюсного расстояния между электродами, снижение электросопротивления в аноде, в подине и в ошиновке.

Работы ведутся в направлении изменения конструкции катода и анода, ошиновки электролизной ванны, теплоизоляции анодов с целью понижения

потерь тепла и повышения магнитодинамической (далее МГД) стабильности электролизеров.

Также в эти мероприятия входит ужесточение нормативов эксплуатации и выбора оптимальных технологических параметров работы электролизёров.

Приоритетными направлениями работ для уменьшения расхода электроэнергии можно назвать:

- снижение межполюсного расстояния за счет понижения потери тепловой энергии через бортовые стенки, днище и верх электролизера;
- снижение высоты шахты и уровня металла;
- снижение напряжения в подовых блоках и блюмсе;
- снижение напряжения в обожженных анодах;
- повышение запаса МГД стабильности за счет изменения футеровки и ошиновки электролизера;
- поиск оптимальных технологических параметров и методов управления.

Работы в области разработки и испытаний технических решений ведутся в следующей последовательности: [1]

- измерение физических полей электролизера;
- разработка технических решений и их проверка на основе математического моделирования;
- разработка конструкторской и технологической документации;
- монтаж, пуск и опытно-промышленные испытания технологии электролиза с разработанными техническими решениями;
- технико-экономическое обоснование и принятие решения о внедрении.

Известно, что наиболее высокий потенциал в снижении удельного расхода энергии электролизера состоит в достижении минимального расстояния между подошвой анодов и поверхностью металла (далее МПР).

Уменьшение МПР зачастую ведет к неприемлемому выходу по току и нарушению энергетического баланса МГД-нестабильности. Данную проблему возможно решить двумя известными способами.

Первый заключается в изменения распределения тока в жидком металле при сохранении стандартной поверхности катода.

Взаимодействие тока данной плотности с магнитным полем в жидком металле определяет критическое МПР. Это возможно достичь путем модификации размеров блюмсов или шин, их свойств и разновидности.

Второе решение – это модернизация формы поверхности катода. При этом неровная поверхность катода амортизирует волны, образуемые МГД-состоянием электролизера, наподобие морского волнореза.

Чтобы найти решение этой проблемы необходимо определить состояние электролизера в момент наличия в нем волн, а именно температурное, электрическое и магнитогидродинамическое его состояние.

Вариантов конструкций катодов можно рассмотреть несколько. Для снижения МПР и условия сохранения теплового баланса можно варьировать другими параметрами.

Повышенная сила тока, это традиционный путь, однако возможно в том числе рассмотреть другие варианты, например снижение уровня металла в электролизере и улучшение теплоизоляции.

Оба этих варианта ведут экономии удельного расхода энергии в заданных рамках, но также могут привести к обратному эффекту в масштабах завода. Каждая технология электролиза имеет свои особенности.

Технологии электролиза могут различаться составом электролита, общей геометрией анода и катода, анодной плотностью тока, и др.

Для того, чтобы иметь возможность оценить потенциал технологии или увидеть прогресс от ее применения, необходимо анализировать каждый случай по отдельности [2].

Целью работы является снижение удельного расхода электроэнергии при производстве алюминия с применением рельефных подин катода.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести литературный обзор по обозначенной теме;
- обосновать при помощи технологического расчета процесс электролиза алюминия с применением рельефной подины в электролизере Содерберга;
- сделать выводы по экономической эффективности.



## 1 Литературный обзор

Алюминий – важнейший металл в промышленности. Объем его производства значительно выше, чем выпуск остальных цветных металлов. Выпуск алюминия уступает только производству стали [1].

Растущий спрос на алюминий объясняется его физическими и химическими свойствами. Он нашел широкое применение в, авиа- и автостроении, транспорте, производстве бытовой техники, строительстве, пищевой промышленности и т.д. Металлургия алюминия включает четыре основных вида производства: глинозема, фтористых солей, угольных электродов и электролитическое производство алюминия [2].

Глинозём, то есть  $Al_2O_3$  получают преимущественно из бокситов, фтористые соли из плавикового шпата. Производство угольных электродов обычно осуществляется на алюминиевых заводах. [3] Основным методом алюминия из глинозёма является электролиз. На рисунке 1.1 представлена принципиальная схема электролизного цеха для получения алюминия.

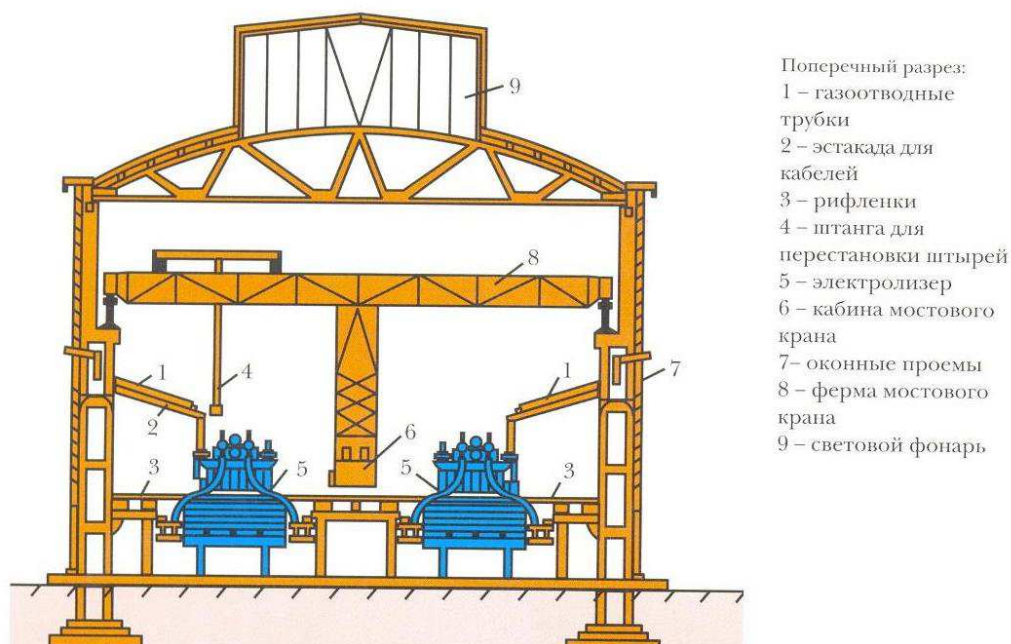


Рисунок 1.1 - Принципиальная схема электролизного цеха для получения алюминия (разрез)

Суть электролиза заключается в том, что при пропускании внешнего (поляризующего) постоянного тока через цепь, составленную из двух электродов (проводников первого рода) и электролита (проводника второго рода), между ними на границах раздела электрод - электролит, протекают процессы восстановления ионов металла на катоде. Совокупность явлений, происходящих в такой системе, носит название электролиза [4].

Катионы, положительно заряженные частицы, под действием электрического тока направляются к катоду, где и разряжаются, а анионы - отрицательно заряженные частицы - перемещаются к аноду [5].

Движением ионов к соответствующим электродам (катоду и аноду) и осуществляется передача электрического тока через раствор [6].

Образовавшиеся при растворении вещества ионы несут эквивалентное количество положительных и отрицательных зарядов.

При прохождении электрического тока через раствор происходят химические превращения. Количественная связь, происходящая между химическими превращениями и электрической энергией у электродов, выражается законами Фарадея [7].

В соответствии с первым законом Фарадея, выделяемое количество вещества по массе при электролизе пропорционально количеству прошедшего через раствор электричества и времени.

Согласно второму закону Фарадея, для растворения или осаждения одного моль-эквивалентов металла другого вещества, требуется пропустить 96500 кулонов электричества или один Фарадей [8].

Обычно принято измерять количество электричества в ампер/часах. Один Фарадей определяют по формуле 1.1

$$96500 : 3600,0 = 26,8 \text{ А/ч}, \quad (1.1)$$

где 3600,0 - количество кулонов, равное одному ампер/часу.

На практике при расчетах пользуются величинами электрохимических эквивалентов металлов - массой металла, выделяемого одним ампер/часом.

Практически эта величина никогда не достигается, т.к. не все количество тока используется для осаждения металла [9].

На величину потерь тока могут повлиять такие причины, как: утечки тока, возникающие как в результате заземления цепи, так и утечки электролита, короткие замыкания между электродами, побочные химические и электрические процессы, перегрев электролита и контактов [10].

В заводской практике было принято понятие «выход по току», которое включает в себя практический смысл и учитывает потери тока.

Выход по току рассчитывается как отношение фактически полученного количества металла к теоретически возможному при данных силе тока и продолжительности электролиза, определяют по формуле 1.2

$$\eta = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{Q_{\text{факт}}}{I \cdot t \cdot g \cdot n}, \quad (1.2)$$

где  $Q_{\text{факт}}$  – количество катодного металла, т;

$Q_{\text{теор}}$  – теоретически рассчитанное количество металла, полученного на катоде, т;

$I$  - сила тока, проходящего через электролизер, А;

$t$  - время электролиза, час;

$g$  - электрохимический эквивалент, г/а·час;  $n$  – количество ванн в серии.

Электролиты, подобно другим проводникам, оказывают некоторое сопротивление прохождению через них электрического тока.

Сопротивление электролита  $R$  прямо пропорционально межэлектродному расстоянию  $L$  и обратно пропорционально поперечному сечению  $S$ , определяют по формуле 1.3

$$R = \chi \cdot L / S, \text{ Ом}, \quad (1.3)$$

Коэффициент пропорциональности зависит от природы раствора и называется его удельным сопротивлением [11].

Удельное сопротивление равно сопротивлению, которое оказывает при прохождении электрического тока электрический проводник в форме куба с длиной ребра в 1 см. [12].

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной электропроводностью ( $\chi$ ) и определяется по формуле 1.4

$$\chi = 1 / R, \text{ Ом}^{-1}, \quad (1.4)$$

Удельная электропроводность электролита зависит от природы электролита и от его температуры. С ростом температуры электропроводность возрастает.

Процессы, происходящие под влиянием электрического тока на электродах, находящихся в растворе электролита, называются электродными процессами. Они протекают на границе двух фаз: металла и раствора электролита.

При погружении металла, например меди в раствор, содержащий ионы этого металла, возможны следующие электродные процессы: переход меди с поверхности металла в виде ионов ( $\text{Cu}^{2+}$ ) в раствор и обратный процесс перехода ионов меди, находящихся в растворе, на поверхность металла.

Таким образом, на границе раздела фаз металл-раствор, протекают электрохимические реакции, в результате которых поверхность электрода приобретает заряд.

Знак этого заряда будет зависеть от того, какой из указанных процессов протекает преимущественно.

В первый момент с металлической пластинки в раствор преимущественно начнут переходить ионы  $\text{Cu}^{2+}$ , в результате чего поверхность пластинки зарядится отрицательно за счет избытка электронов.

В дальнейшем по мере увеличения концентрации ионов в растворе, этот переход начнет уменьшаться, в какой-то момент на границе металл-раствор наступит равновесие. То есть скорости станут равны.

В результате электростатического взаимодействия между заряженной поверхностью металла и ионами противоположного знака формирует двойной электрический слой и происходит скачок потенциала, вследствие чего получается разность зарядов поверхностного слоев фаз.

Этот скачок всегда происходит на границе раздела электрод-фаза электрическая и называется электродным потенциалом.

Растворение металла или осаждение катионов происходит только в том случае, если процессы сопровождаются движением электронов по внешней электрической цепи.

Таким образом, возникновение и прохождение электрического тока возможно лишь при наличии достаточной разности потенциалов на электродах.

Для разряда катионов и выделения их на катоде необходимо приложить к катоду извне такой потенциал, который может преодолеть скачок потенциала на границе металл-раствор.

Для сравнения напряжения разложения ионов различных элементов определяется напряжением разложения каждого из них в одних и тех же условиях - при одинаковой температуре и концентрации одноименных ионов в растворе; для удобства сравнения измеряются потенциалы в растворах, имеющих концентрацию одноименных ионов 1 г / ион на 1 дм<sup>3</sup> воды. Эти потенциалы называются нормальными потенциалами ( $E_0$ ).

Нормальный потенциал металла измеряется разностью потенциалов, возникающих при соединении исследуемого металла с материалом, имеющим постоянный потенциал.

Стандартное сравнение электрода - водородный электрод, потенциал которого условно принят за ноль.

Металлы по ряду напряжений делятся на две группы:

– менее электроположительные, чем водород. Потенциалы этих металлов обозначаются отрицательным знаком;

– более электроположительные, чем водород. Потенциалы этих обозначаются положительным знаком.

При электролизе для преодоления сопротивления различных участков электрической цепи на пути прохождения тока необходимо подавать дополнительное напряжение.

К этим сопротивлениям относятся:

– катодная и анодная поляризация, достигающая иногда значительных величин;

– сопротивление электролита, находящегося между электродами;

– сопротивление электродов, контактов.

Общее напряжение  $U$  на электролизной ванне определяется формулой 1.5

$$U = (E_a - E_k) + IR_1 + IR_2, \quad (1.5)$$

где  $E_a, E_k$  - разность потенциалов анода и катода (поляризация);

$IR_1$  - падение напряжения в электролите;

$IR_2$  - падение напряжения в контактах.

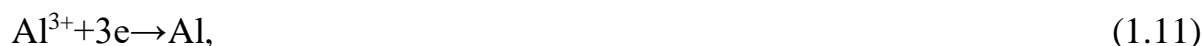
Напряжение на блоке или серии ванн является суммой напряжения на всех ваннах блока или серии.

Механизм электролиза криолито-глиноземных расплавов идет по следующим уравнениям реакций, которые определяются по формулам 1.6-1.10





На катоде будет происходить разряд катионов алюминия:



На аноде – разряд ионов кислорода с образованием  $\text{CO}_2$ :



### **1.1 Обзор существующих технологий**

Для электролизного получения алюминия в России и за рубежом используются электролизёры различного типа.

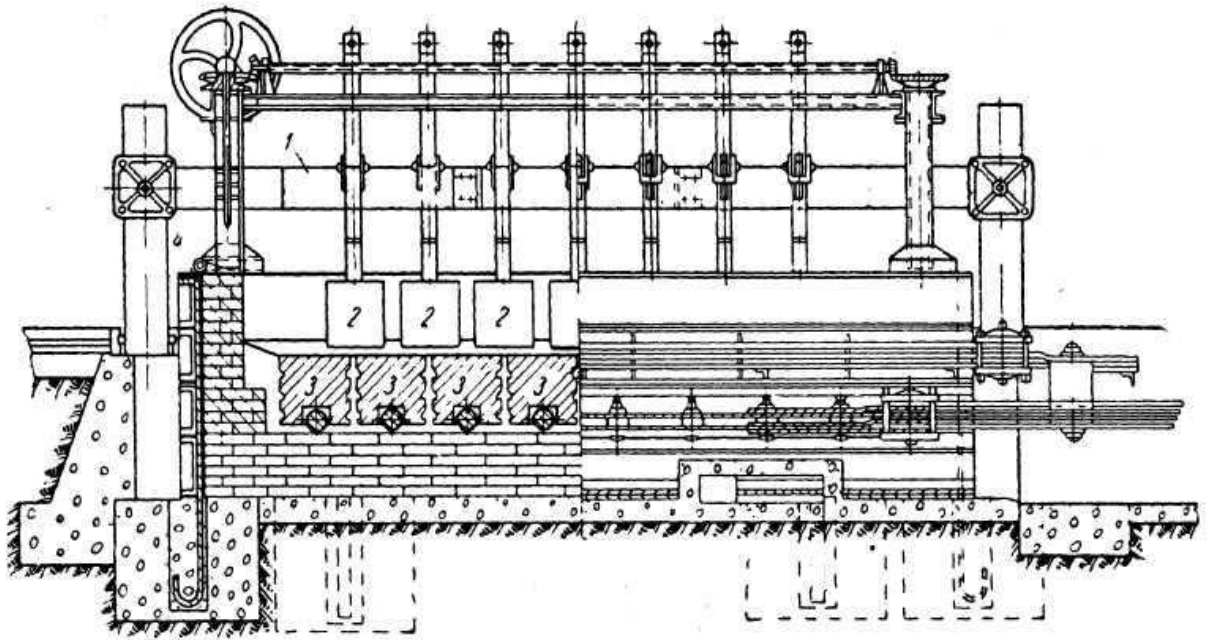
Электролизер с системой обожженных анодов (рис.1.2 и 1.9), электролизер с самообжигающимися анодами с боковым (рис. 1.5) верхним (рис 1.7) токоподводами.

На каждом этапе развития технологии испытаний целью совершенствования конструкции является повышение работоспособности анализатора при минимальных трудозатратах на техническое обслуживание. [13].

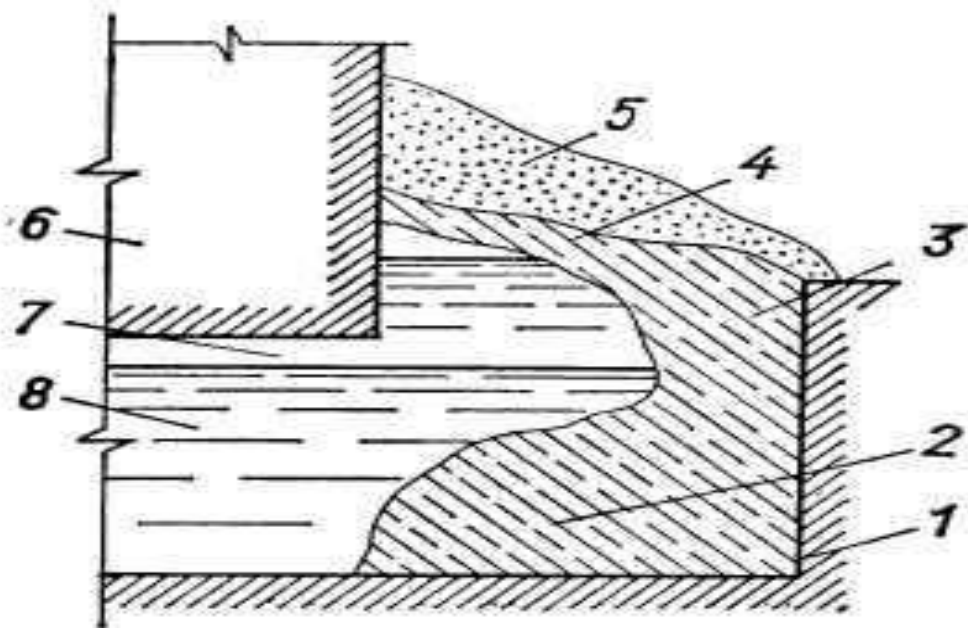
Усовершенствования велись в направлении снижения затрат энергии, тяжелых условий труда и снижения воздействия на окружающую среду [14].

При увеличении мощности электролизеров возрастали его габариты и изменялись конструктивные элементы.

Основные виды электролизеров представлены на рисунках 1.2-1.9.



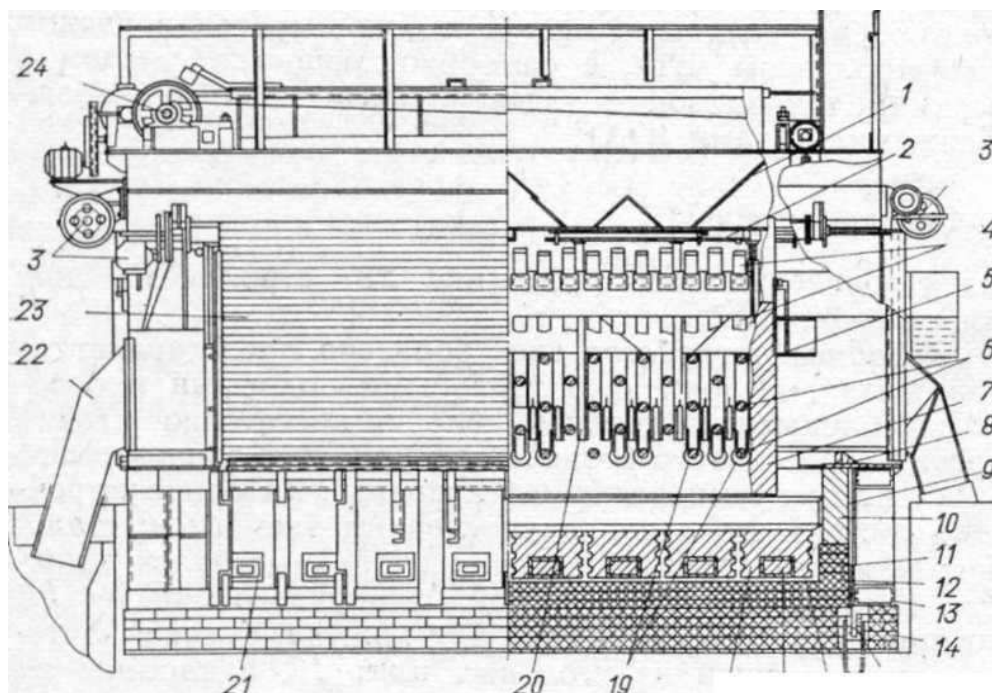
1 - анодная шина; 2 - обожженные аноды; 3 - катодные блоки; 4 - кожух ванны  
 Рисунок 1.2 - Алюминиевая ванна с обожженными анодами (вид сбоку).



1 - футеровка; 2 - подовая настель; 3 - боковой гарнисаж; 4 - электролитная корка;  
 5 - глиноземная

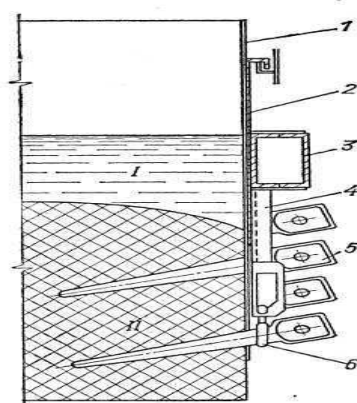
Рисунок 1.3 - Схема рабочего пространства электролизера





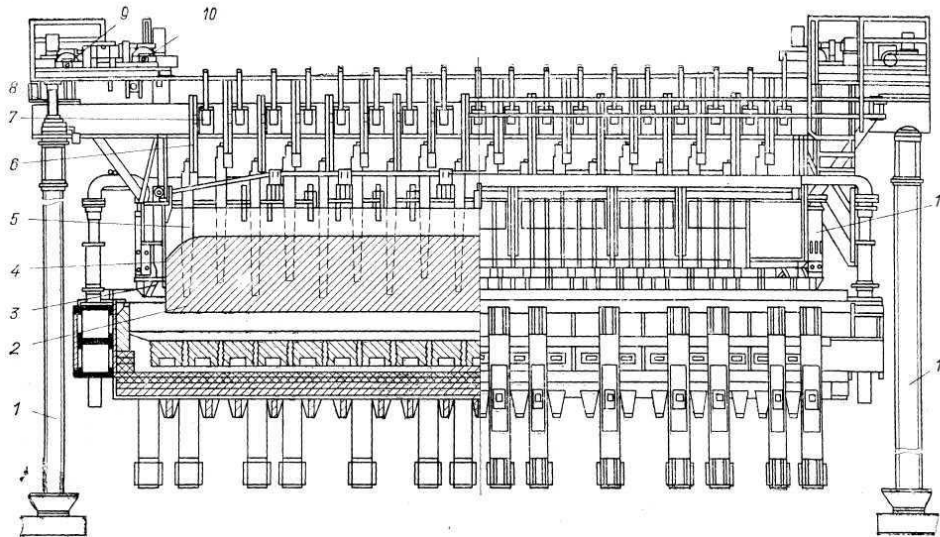
1 - бункера для глинозема; 2- затворы бункеров для глинозема; 3 - подъема штор; 4 - анодные медные спуски; 5 - анодная рама; 6 - анодные штыри; 7 - анод; 8- бортовой фланцевый лист; 9- шамотная засыпка; 10- боковая угольная футеровка; 11- бровка; 12- шамотный кирпич; 13 - катодный кожух; 14 - кирпичная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

Рисунок 1.4 - Электролизер БТ (продольный разрез)



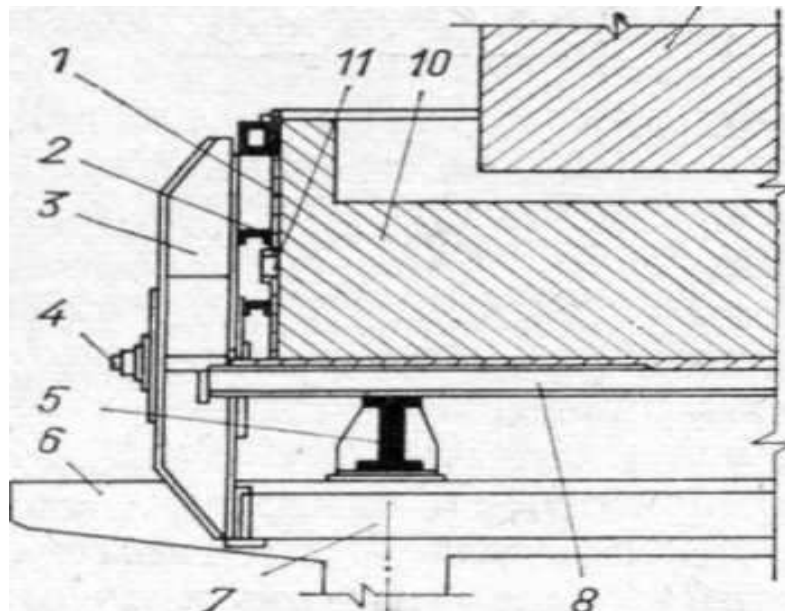
2 - анодный каркас; 3 - анодная рама; 4 - перо; 5 - штырь; 6 - серьга; I - жидкая часть анодной массы; II - скоксованный анод

Рисунок 1.5 - Поперечный разрез анода электролизера БТ: 1 - алюминиевая обечайка



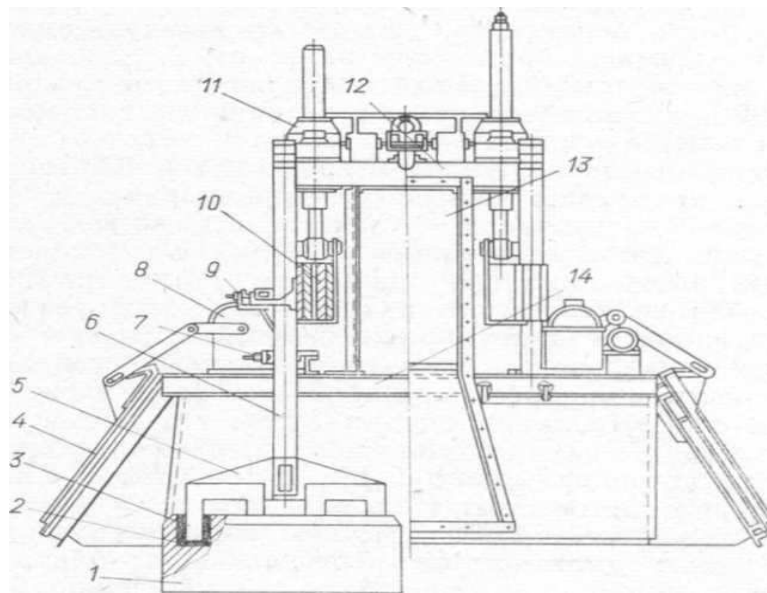
1 - колонна; 2 - анод; 3 - газосборный колокол; 4 - анодный кожух; 5 - составной штырь; 6 - алюминиевая штанга штыря; 7 - зажим штыря; 8 - домкрат основного механизма подъема анода; 9 - электромотор основного механизма подъема анода; 10 - электромотор вспомогательного механизма; 11 - горелка.

Рисунок 1.6 - Электролизер ВТ (продольный разрез)



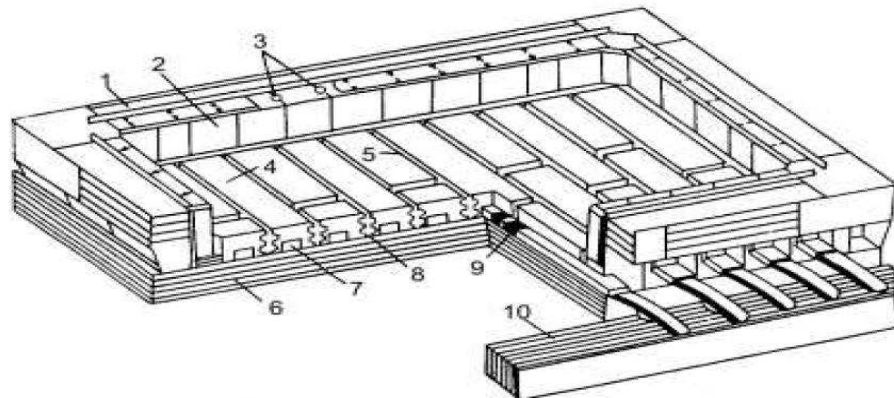
1 - кожух; 2 - швеллер; 3 - контрфорс; 4 - шпилька с гайкой; 5 - продольная балка; 6, 7 - железобетонные балки; 8 - поперечная балка; 9 - анод; 10 - футеровка кожуха; 11 - окно для катодного стержня

Рисунок 1.7 - Катодное устройство электролизера, ВТ (поперечный разрез)



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

Рисунок 1.8 –Анодное устройство электролизера ОА



- 1 - катодный кожух; 2 - бортовые блоки; 3 - пробки из подовой массы;
- 4 – подовые блоки; 5 - межблочные швы; 6 - огнеупорный и теплоизоляционный цоколь; 7 - катодные стержни; 8 - подблочная засыпка; 9 - пробки для защиты блюмсов; 10 – ошиновка

Рисунок 1.9 - Анодное устройство электролизера ОА (поперечный разрез)

Работа электролизера начинается тогда, когда на нем устанавливается баланс прихода и потребления тепла, то есть происходит тепловой баланс системы [15].

Электролизер характеризуется энергетическими и технологическими режимами работы, расчетным проектированием в зависимости от конструкции агрегата. К таким параметрам относятся сила тока, мощность, рабочее и среднее давление, температурное количество алюминиевого сырья, перепады давления в подлине, состав электролита, длительность анодных эффектов, формы рабочих пространств и технологические параметры формирования анод [16].

Силу тока устанавливают в зависимости от размера, конструкции, технологического состояния, а также корректируют в соответствии с техническими возможностями оборудования преобразовательной станции.

Учет силы тока ведут по показаниям счетчиков ампер-часов.

Средняя мощность по всей линии электролизного агрегата рассчитывается по вольт-часовому показанию. Рабочее напряжение электролизеров контролируется вольтметром, установленным на самих электролизерах. Рабочее напряжение поддерживается в пределах, указанных в руководстве по эксплуатации. Рабочее давление автоматически регулируется и поддерживается в заданных пределах с учетом только сопротивления [17].

Температура электролита оказывает большое влияние на производительность электролизера, поскольку основные тенденции этого процесса заключаются в поддержании температуры на нижнем пределе, вплоть до снижения тока, прочности ряда [18].

Количество алюминия в электролизерах характерно для уровня металла по высоте шахты.

Из-за высокой теплопроводимости, передача тепла испытания регулируется его уровнем. При высоком уровне алюминия тем больше

теплопередача боковой поверхности катодного узла электролизера. Также при повышении уровня металла происходит увеличение образование осадка на подине и настыеобразование. Эти процессы приводят к существенному снижению выхода по току и производительности электролизера. Оптимальный уровень металла устанавливается технологической инструкцией для каждого вида электролизера индивидуально.

Современная практика ведения процессов электролиза алюминия имеет особенности в области экономии электроэнергии. На заводах стран, где стоимость электроэнергии относительно невысока, работа ведется в режиме интенсификации, для чего поддерживают достаточно высокий уровень металла. В странах и районах с высокими ценами на энергоресурсы выбирают менее режим работы менее интенсивный и устанавливают более низкий уровень металла [19].

На данный момент времени в нашей стране работают 11 заводов по производству алюминия. Оборудование заводов составляют два основных типа электролизеров. Это электролизеры с предварительно обожженными анодами (ОА) и электролизеры с самообжигающимся анодом. Наиболее высокими технико-экономическими и экологическими показателями в производстве алюминия характеризуются электролизеры ОА [20].

Электролизёры с СА и верхним токоподводом имеют более низкие технические показатели выхода металла по току, большой расход электроэнергии и худшие экологические характеристики процесса в сравнении с электролизёрами с обожженными анодами. Несомненным их преимуществом является обеспечение получения алюминия с более низкой себестоимостью производства.

Новые алюминиевые заводы, как в нашей стране, так и за рубежом, строятся с учетом работы электролизеров большой мощности с предварительно обожженными анодами, которые несомненно имеют преимущество по сравнению с технологией Содерберга. В том числе и меньшие затраты на электроэнергию [21].

Российская алюминиевая промышленность отличается тем, что около 65% производимого алюминия выпускается в электролизерах Содерберга с самообжигающимся анодом. По этой технологии работают Братский и Красноярский алюминиевые заводы, входящие в компанию РУСАЛ.

К современной технологии электролитического получения алюминия с анодом Содерберга «РУСАЛ» работает с 2005 года по проекту «Экологический Содерберг». Стратегической целью данной работы является создание конкурентного электролизера на основе существующих конструкций С-8БМ, С-8БМЭ. Задачей данной работы является обеспечение высоких технико-экономических показателей энергетического процесса и снижение выбросов токсичных веществ [22].

Также в задачи входит:

- увеличение выхода по току алюминия;
- повышение силы тока;
- сокращение расходов анодной массы;
- уменьшение затрат электроэнергии

## **1.2 Снижение расхода электроэнергии на заводах России и за рубежом**

Как было уже сказано, сущность проблемы электролитического получения алюминия заключается в большом потреблении электроэнергии алюминиевыми заводами при истощении невозобновляемых источников энергоресурсов.

Расчет энергопотребления по процессу электролиза, базирующийся на законе Ома, выражается формулой 1.13

$$W = 2,98 V/\eta = 2,98(I \cdot R)/\eta \quad (1.13)$$

Из формулы видно, что снижение напряжением  $V$  либо повышением выхода по току  $\eta$  и снижением сопротивлением  $R$  может достигаться энергосбережение электролизера [23].

Графически потенциал энергосбережения электролизера представлен на рисунке 1.10.

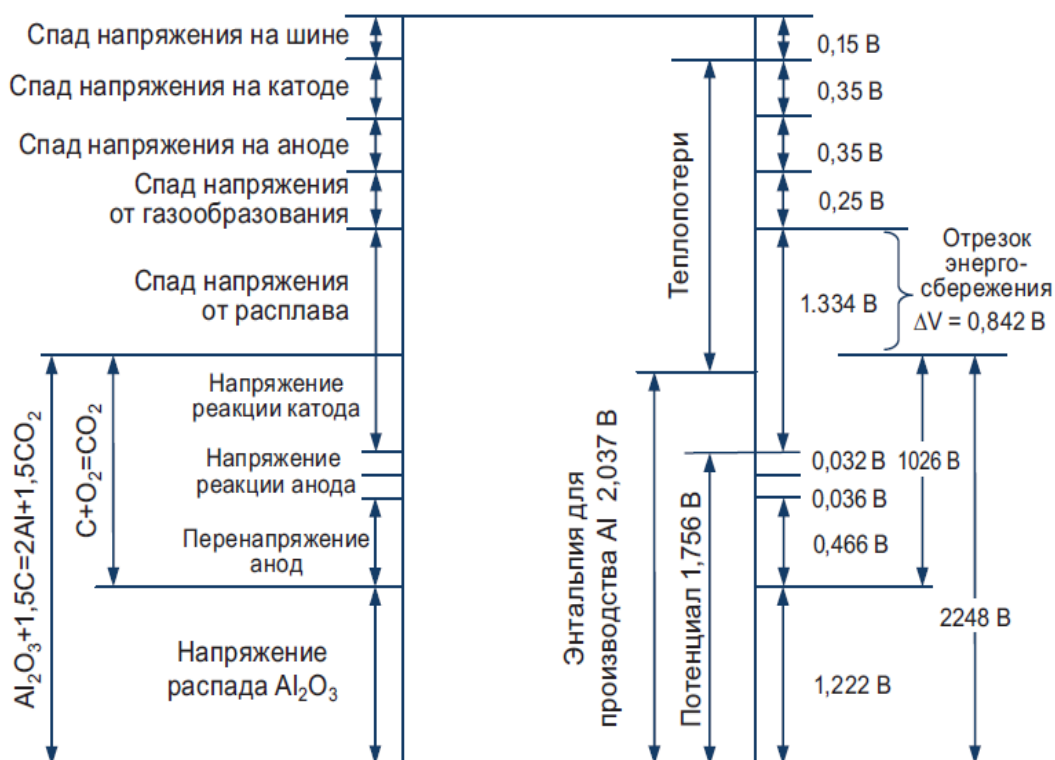


Рисунок 1.10 - Напряжение и энергетический баланс электролизера

Как видно из рисунка 1.12, напряжение, требуемое для работы электролизера составляет сумму:

$$V_{\text{экв. для алюминия}} + V_{\text{от газообразования}} + V_{\text{анодное}} + V_{\text{катодное}} + V_{\text{ошиновки}} = 3,348 \text{ В.}$$

А минимальное напряжение для реакции между анодами и катодами составляет:

$$V_{\text{распада}} + V_{\text{перенапряжения анода}} + V_{\text{реакции анода}} + V_{\text{реакции катодов}} - V_{\text{экв. для алюминия}} = 2,248 - 1,756 = 0,492 \text{ В}$$

Зная, что каждые 100 мм расстояния между анодом и катодом соответствуют снижению напряжения на 0,3–0,492 В, и принимая во внимание снижение напряжения от газообразования (0,17–0,25 В), можно рассчитать теоретический минимум расстояния между электродами, которое составит:  $(0,492+0,17\sim 0,25)/0,3=2,2\sim 2,47\text{см}$ .

Из расчета энергетического баланса видно, что для поддержания теплового баланса необходимого для нормальной работы электролизера, падение напряжения от расплава равно 1,334 В. Это соответствует расстоянию 4,45 см. Оно должно включать в себя  $1,334 - 0,492 = 0,842$  В, что соответствует расстоянию 2,8 см для покрытия тепла потерь от кожуха электролизера, необходимой теплоизоляции и компенсации перерасхода энергии от колебания уровня металла.

Из этого следует, что представленные на рисунке 1.10 падения напряжения из-за расплава (0,842 В) и из-за газообразования (0,25 В) могут быть рассмотрены в работе электролизера как потенциальные источники энергосбережения [24].

Перемещение электролита между положительным и отрицательным электродами алюминиевого электролизера имеет следующие черты [25].

На рисунке 1.11, графически изображено, что есть минимально эффективное расстояние между электродами, «расстояние нагрева», которое необходимо для поддержания электрохимической реакции (расстояние нагрева) и для теплового баланса электролизера (расстояние газообразования). В результате последнего происходит отвод газа, при котором, под действием электромагнитного поля, возникают флуктуации на поверхности жидкого металла.

Концентрация металла при этом неоднородна в разных частях расплава. Концентрация алюминия выше вблизи жидкого слоя. То есть при сильных флуктуациях поверхности металла происходит потеря алюминия из-за вторичной реакции [26].

[Изъято 4 страницы]



В технологическом аспекте первичная алюминиевая промышленность Китая развивалась бурными темпами. К концу первого десятилетия нашего века среднее потребление электроэнергии на тонну алюминия китайскими электролизерами составило цифру 13084 кВт·ч. Это на 1500 кВт·ч меньше, чем начале нашего века.

Некоторые китайские заводы достигли показателей в 12500 кВт·ч на тонну алюминия. Однако, ее доля в себестоимости электролизера составила 40 %, что лишь на 15 % превышает нормальный уровень. Причина в повышении стоимости электроэнергии, установленной европейскими странами. В связи с этим, китайская алюминиевая промышленность вынуждена вести борьбу за выживание.

В таблице 1.1 приведены технические данные, при которых потребление постоянного тока снижено до менее 12000 кВтч/т-Al.

Таблица 1.1 -Технические данные по потреблению постоянного тока

Напряжение на электролизёре	Выход по току	Потребление пост.тока (кВт*ч/т)
3,83	95%	12014
3,78	94%	11983
3,75	93%	12016
3,7	92%	11985
3,7	93%	11855
3,7	94%	11729
3,7	95%	11606
3,65	95%	11449
3,6	94%	11412

Помимо того, что был введен интегрированный режим потребления электроэнергии целью обеспечения приемлемых тарифов на электроэнергию для всех заводов, было принято решение по разработке и применению технологии высокоамперных ванн.

Высокоамперные электролизеры характеризуются высокой производительностью при низком энергопотреблении [29].

Таким образом возможность экстремального технического развития китайских заводов имела основание благодаря следующим факторам.

Возможность моделировать технологические процессы и оптимизировать технические решения позволило развитие современных прикладных компьютерных технологий.

Как следствие развития компьютерных технологий появилась возможность автоматизировать системы обслуживания электролизеров, адаптировать их под качество сырья и особенности технологии, что оказало значительную поддержку в достижении повышения производственных показателей, сохранения энергии, повышение показателей энергосбережения и сокращение количества выбросов.

Сократить сроки строительства, повысить качество и снизить издержки алюминиевой промышленности Китая продиктовала конкурентная среда на рынке поставщиков, оборудования и строительных материалов. Как видно из таблицы 1.2, объемов инвестиций и сроков строительства между Китаем и западными странами, алюминиевая промышленность Китая в данных условиях оказалась на высоте [30].

Таблица 1.2 - Сравнение объемов инвестиций и сроков строительства между Китаем и западными странами

Страна	Инвестиции для модернизации	Инвестиции для расширения	Инвестиции для нового завода	Срок строительства
Европейские и Американские страны	<1000 USD/т	2500-3500 USD/т	3500-4500 USD/т	2-3 года
Китай	<800 USD/т	1600 USD/т	2400 USD/т	1-1,5 года

Надежная основа для проектирования энергосберегающих электролизеров с высокой производительностью с силой тока 300–500 кА была обеспечена развитием компьютерного моделирования, в частности, таких программ, как ANSYS, MARC, ADINA. Эти компьютерные программы

способны моделировать физические поля электрическое, тепловое, магнитные, и силовое.

Далее необходимо упомянуть о модернизации электродов электролизера, которое может дать возможность повысить показатели энергосбережения.

В 1990 г. Р. Шехаром был впервые предложен анод с прорезями. Было проведено водное моделирование показавшее, что прорези позволяют снизить пенообразование и выровнять подачу глинозема в пространство между положительным и отрицательным электродами. Как видно на рисунке 1.15, в нижней части анода делаются прорези вдоль или поперек. По результатам испытаний на электролизерах с силой тока 300 кА были сделаны выводы, что при использовании такого вида анодов, напряжение снижается.

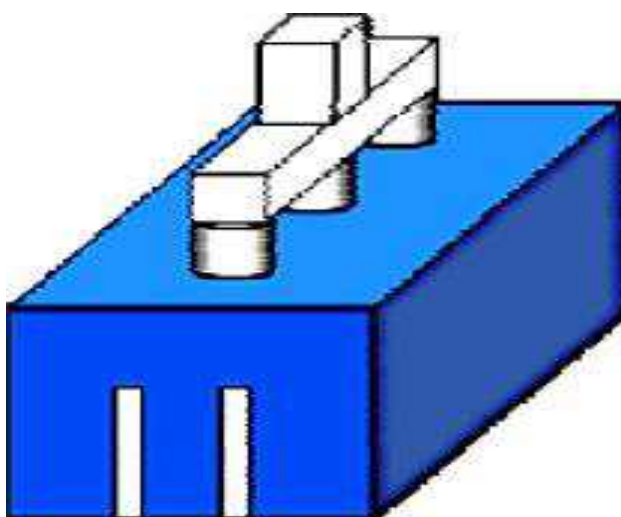


Рисунок 1.15 - Анод с прорезями

Также были проведены исследования по модернизации катодов. Применяемые для электролиза алюминия катодные блоки бывают трех основных типов: графитовые, графитизированные и антрацитные.

По результатам испытаний компанией Pechiney на электролизерах AP18, падение напряжения на катоде с содержанием графита от 10 до 15% на 15–20

мВ меньше, чем на антрацитном катоде. На катоде с содержанием графита 30% – на 45 мВ меньше, чем на антрацитном.

В Китае электролизеры на 230 кА с катодными блоками, содержащими 40–50 % графита, сократили падение напряжения на 50 мВ по сравнению с электролизерами с катодными блоками, содержащими 10 % графита.

Электролизеры на 300 кА с графитизированными катодными блоками сократили падение напряжения на 80 мВ по сравнению с электролизерами с катодными блоками, содержащими 10 % графита.

При замене на графитизированные катодные блоки появилась проблема незначительного охлаждения при относительно низкой плотности тока на аноде 0,69–0,74 А/см<sup>2</sup>.

Поэтому графитизированные катодные блоки следует с осторожностью применять на электролизерах у которых плотность тока на аноде менее 0,8 А/см<sup>2</sup>.

Графитизированные катодные блоки имеют пониженный коэффициент теплового расширения (<0,25 %), потому было рекомендовано применять холодную набивную массу с низким показателем усадки при обжиге (<0,15 %) во избежание раннего повреждения футеровки.

Технология изготовления катодов модернизированной формы базируется на теории недопущения кругового движения расплава металла в электролизере.

В последние годы в Китае был зарегистрирован ряд патентов касательно формы катода (рисунок 1.16).

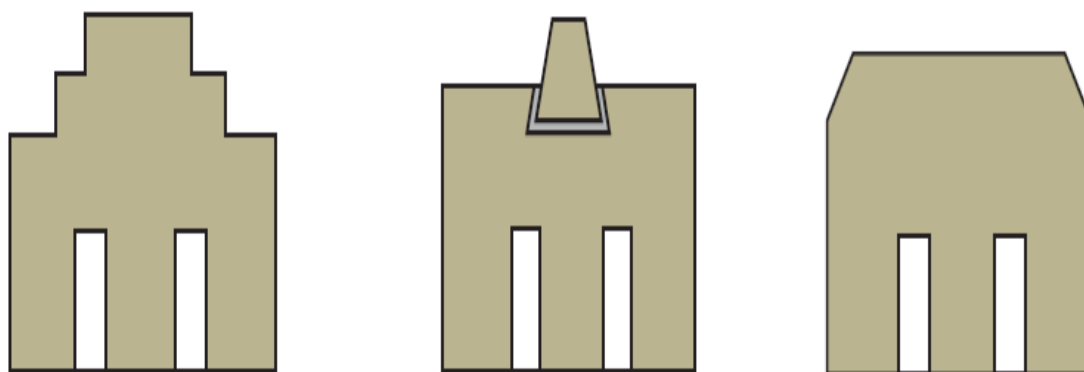


Рисунок 1.16 - Запатентованные в Китае модернизированные формы катодов

Применение таких форм позволило сократить скорость потока, уменьшить флуктуации поверхности металла, улучшить показатели динамической стабильности алюминиевого электролизера.

Испытание катодов модернизированной формы на алюминиевых заводах Китая дало хорошие результаты, сократив энергопотребление на 500–1000 кВт·ч/т.

Особенностью электролизера с катодом модернизированной конструкции является выпуклость поверхности катода.

Катоды новой конструкции способствуют снижению колебаний жидкого алюминия на катоде.

Исследования Yang Song подтвердили, что катод новой конструкции может снизить амплитуду колебания жидкого алюминия на катоде на 1,0 см. (рисунок 1.17).

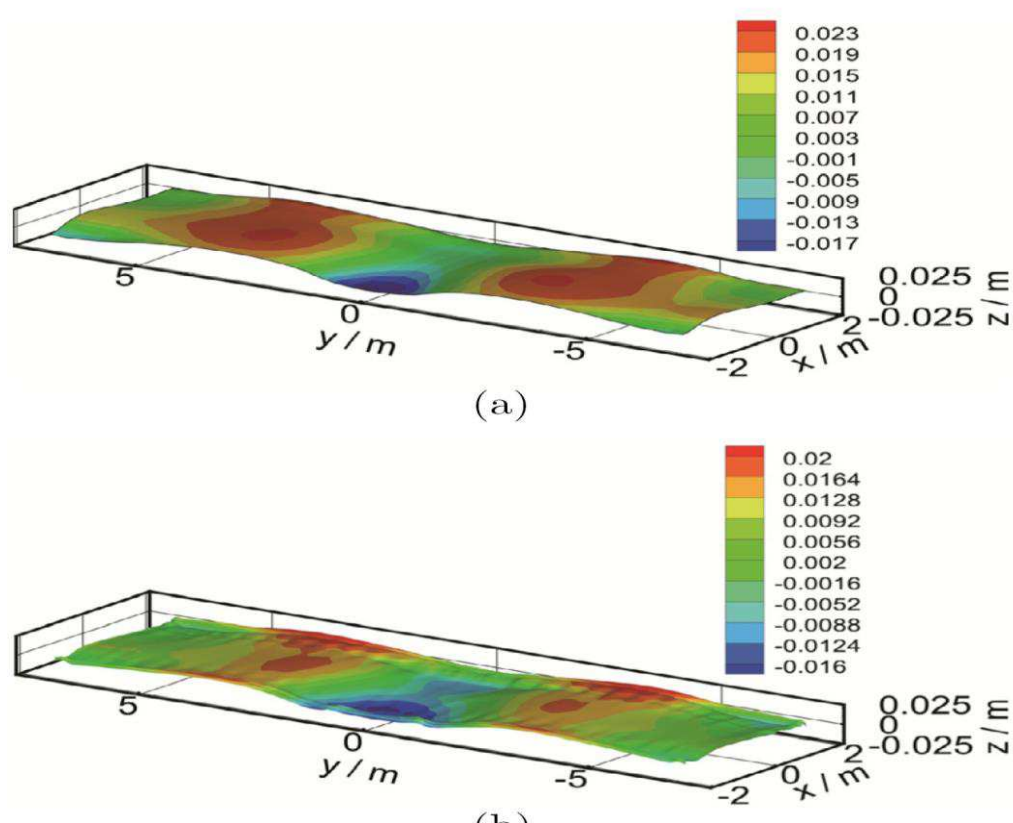


Рисунок 1.17 - Колебания уровня жидкого алюминия в алюминиевом

## электролизере

В 2013 году в нашей стране заявлен патент на изобретение, в отношении конструкции катодного устройства электролизера Содерберга с обожженными анодами, представляет собой устройство с рельефной подиной, включающее в себя футерованный катодный кожух и подину [31].

Подина изготавливается из подовых блоков, имеющих разные размеры по высоте. Блоки по высоте чередуются между собой.

На обоих краях электролизера установлено минимум два высоких подовых блока которые имеют выступы. Схематично это изображено на рисунке 1.18.

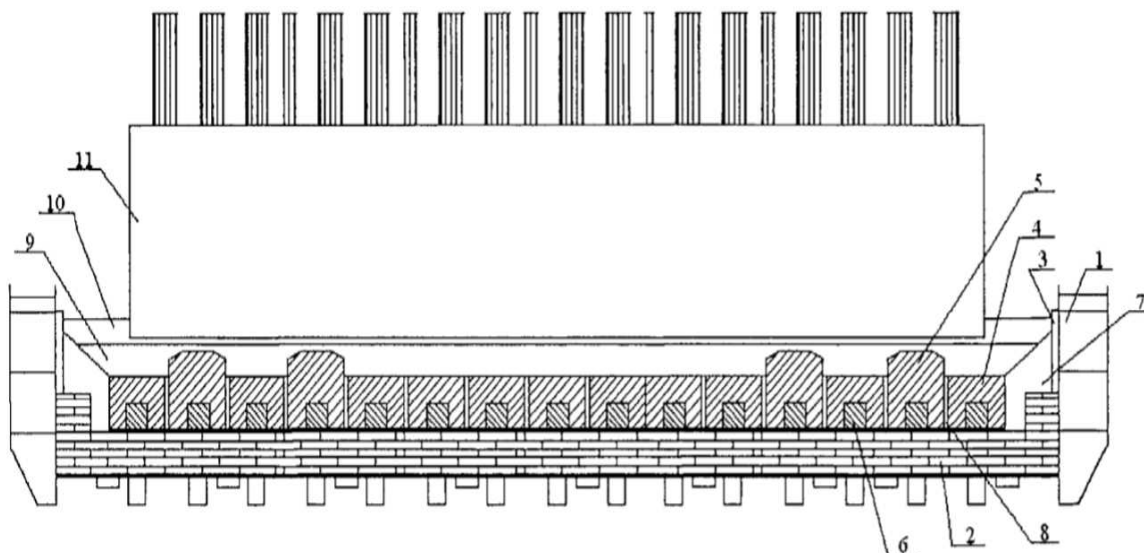


Рисунок 1.18 - Продольный разрез алюминиевого электролизера

Рекомендованная высота выступов подовых блоков составляет одну шестую части от высоты стандартного блока. На верхней части высоких подовых блоков выполнены фаски. Материалом для выступов подовых блоков является углеродный огнеупор, имеющий стойкость к действию расплава.

Уменьшение скорости циркуляции расплава и снижение перекоса металла достигается за счет выступающих барьеров.

Заметно также снижение тепломассопереноса в слое алюминия. Как следствие, уменьшаются тепловые потери с поверхности электролизера и появляется возможность эксплуатировать его с пониженным напряжением.

Известно, что это пробное производство алюминия, при котором слой мелких сыпучих материалов толщиной ~ 50 мм из соединений нитридов, а также боридов титана и компакта или их смеси помещают на пластину для снятия отрицательного влияния циркулирующего потока.

Уровень металла составляет 1-3 мм выше слоя материала. Условия подины могут наклоняться, водонепроницаемые металлические барьеры жидкости могут быть установлены в отсеках.

В нижней части подины оставляют свободный отсек, из которого свободно извлекают жидкий алюминий.

К недостаткам этого решения относятся: высокая стоимость материалов, а также процесс очистки подина от дождя.

Существует электролизер, имеющий следующие модернизированные характеристики. Дно подины из углеродистых блоков содержит футерованный кожух катодный. В нем условия подины выполнены с каналами, образованными вертикальными гранями двух соседних углеродных блоков, для увеличения выходного тока алюминия уменьшением скорости циркулирующего потока катодного металла.

Недостатками данного решения является снижение эффективного срока службы из-за зарастания каналов осадком.

Таким образом, становится понятным, что катодное устройство электролизера является особенно ответственным за увеличение производительности процесса электролиза и увеличение выхода по току.

Его конструкция должна гарантировать надежность работы электролизера и сдерживать частный вывод оборудования на капитальный ремонт.

Профессором Китайского Северо-Восточного университета Feng Naixiang предложено наиболее близкое техническое решение близкое по сущности и

признакам к заявляемому катодному устройству. Это катодное устройство алюминиевого электролизера с рельефной подиной [32].

Характерная особенность электролизера с катодом новой конструкции заключается в выпуклости поверхности катодов (рисунки 1.19 - 1.20).



Рисунок 1.19 - Катоды прямоугольной выпуклой конструкции



Рисунок 1.20 - Катоды цилиндрические выпуклые



Таким образом, в результате обзора мирового и отечественного опыта по снижению потребления электроэнергии с рельефной подиной в катодном устройстве алюминиевого электролизера установлено следующее.

Электролизер с дном, который имеет каналы, образованные вертикальными краями двух смежных углеродных блоков, в которых ток алюминия увеличивается за счет замедления циркулирующего потока катодного металла.

Электролизер с подставкой, имеющей каналы, образованные продольными краями двух смежных углеродных блоков, в которых выход алюминия увеличивается по току, замедляя циркуляционные потоки катодного металла.

Электролизер с установленными взаимозаменяемыми элементами из проводящего огнеупорного материала, который имеет промежуточную инертную поддержку и активные проводящие элементы.

Электролизер с нанесением на основание слоя сыпучих мелких материалов из соединения титана и циркония или смеси этих материалов.

Электролизер с рельефным краем содержит облицованное катодное покрытие и основание из блоков пола разной высоты с выступами.

Для обоснования теоретических выводов рассмотрим вариант применения рельефной подины на электролизере электролизерах Содерберга с самообжигающимся анодом и также возможность предположить повышение выхода по току в среднем на 2%.

### **1.3 Влияние МГД на работу электролизёра и ТЭП**

В электролизере, работающем в идеальных условиях, расплав разделяется на две жидкие фазы различной плотности-электрическую и горячую расплавленную алюминиевую с четко определенной границей раздела. Границы находится в состоянии покоя, то есть не движется [33].

Алюминий, попадающий в электролит в виде металлического тумана или взвеси, растворяется и лишь в небольших количествах достигает анодной области, где он превращается в оксид. Такой электролизер работает с максимальным входом по току [34].

Однако в реальной работе электролизера металл и электролит находятся в движении. Жидкий металл подвергается воздействию электромагнитной силы, а электролит перемещается под действием отступающего анодного газа и тепловых конвективных сил [35].

Это взаимное влияние потока металла и электролита. Наконец, при плавлении теста стула алюминий может наблюдать интенсивный хаос перемешивания и циркуляции переходного металла, наличие металлических дефлекторов и т. д. что отрицательно сказывается на производительности электролизера .

Это в совокупности называется магнитогазодинамической нестабильностью или МГД-нестабильность.

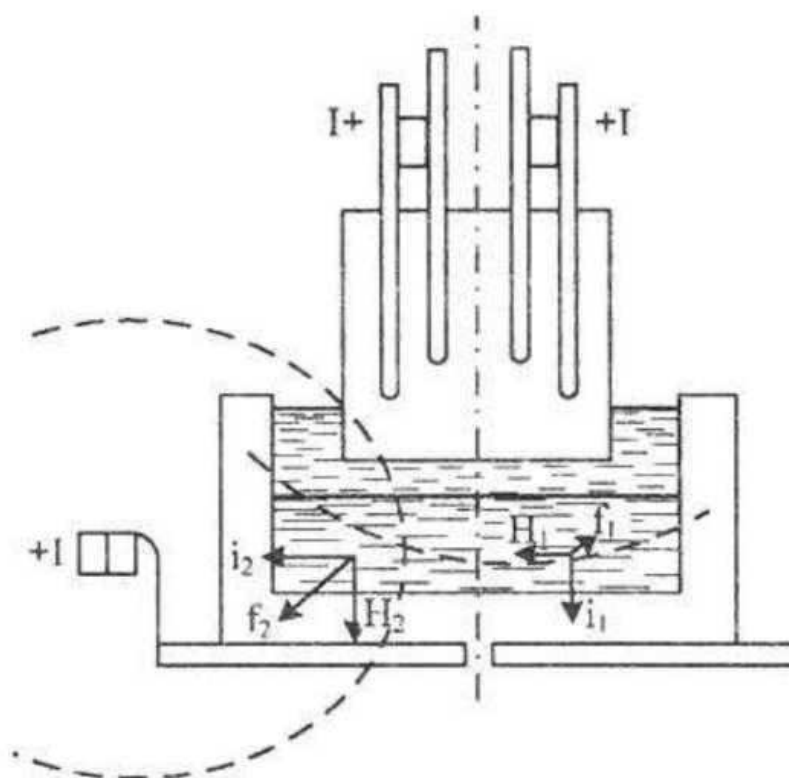
Поскольку увеличивается МГД-нестабильность, увеличение вибрации металлической поверхности становится сравнимым со значением межполюсного расстояния (возможности), т. е. вблизи короткого замыкания анода и катода. Технологическое состояние попытки приближается к «граничным» или «пороговым» условиям, при которых дальнейшее МГД, приводит к нарушению технологии и снижению производительности ванн [36].

Существуют две основные причины МГД-нестабильности: наличие электромагнитных сил в жидком металле и газодинамика в энергетике.

В жидком металле существует взаимодействие электрического и магнитного поля. Взаимодействие магнитного поля проводника и протекающего через него тока создает электромагнитную индукцию, действующие на единицу объема горячей текучей среды перпендикулярно движению тока. Именно силы Лапласа вызывают перемещение расплавленного металла.

Воздействие сил Лапласа, показанных на рисунке 1.21, весьма многообразно.

Это во многом связано с тем, что ток в расплавленном металле течет не строго вертикально, а под определенным углом в направлении наименьшего электрического сопротивления, например, к участкам подины, которые свободны от настывлей и осадков. Поэтому вектор плотности тока в металле можно разложить на три составляющие:  $I_z$  - вертикальная и  $I_y$  и  $I_x$  - две горизонтальные (поперечная -  $I_y$  и продольная -  $I_x$ ).



$H_1$  - вектор напряженности магнитного поля от тока анодных шин;  $H_2$  - вектор напряженности магнитного поля от тока катодных шин;  $i_1$ ,  $i_2$  - направление тока в металле;  $f_1$ ,  $f_2$  - электромагнитные силы

Рисунок 1.21 - Схема действия сил Лапласа в расплаве электролизера

Взаимодействуя с током, магнитное поле формирует поле электромагнитных сил. Составляющие напряженности магнитного поля соответственно обозначаются:

- $B_z$  - вертикальная и две горизонтальные;

– продольная  $V_x$  и поперечная  $V_y$ .

Таким образом, размер электромагнитной индукции в любом направлении рассчитывается векторным произведением плотности тока  $I$  и магнитной индукции  $B$ , то взаимодействие тока и этого поля даст значение мощности соответствующего направления.

Наиболее сильное влияние оказывает взаимодействие вертикальной составляющей магнитной индукции  $B_z$  с горизонтальными токами в металле  $I_x$  и  $I_y$ .

В результате взаимодействия с поперечным током  $I_y$ , величина которого зависит главным образом от бортовых настелей, возникают продольные электромагнитные силы, стремящиеся в центр ванны и увеличивающие перекося алюминия продольный.

Если направление горизонтального тока идет от борта к центру, то взаимодействие его с  $B_z$  вызывает силы в противоположном направлении. В таких ситуациях имеет место быть значительным колебаниям поверхности расплавленного алюминия.

Взаимодействие  $B_z$  с горизонтальным током в том же направлении, что и линейный ток, вызывает поперечные электромагнитные силы, расположенные на входной половине ванны по направлению к продольной оси и на внешней стороне ванны.

В противоположном направлении течения, сила, сила от воли действуют в противоположном направлении.

Характер влияния электромагнитной силы на устойчивость расплавленного металла определяется также тем, что вихрь (динамический) или потенциал.

Профиль скорости циркуляции металла формируется под действием вихревой силы. Схема циркуляции металла является более контурной, т. е. имеется ряд схем связи в одной ячейке.

На рисунке 1.22 показана конфигурация зеркала металла на электролизере.

Количество линий определяется конструкцией ошиновки и технологическими факторами.

Более того, можно предположить, что электролизер имеет свою собственную циркуляцию, с «базовым» вкладом в результирующий график параметров трубы и значительный «индивидуальным» вкладом в неё технологической составляющей.

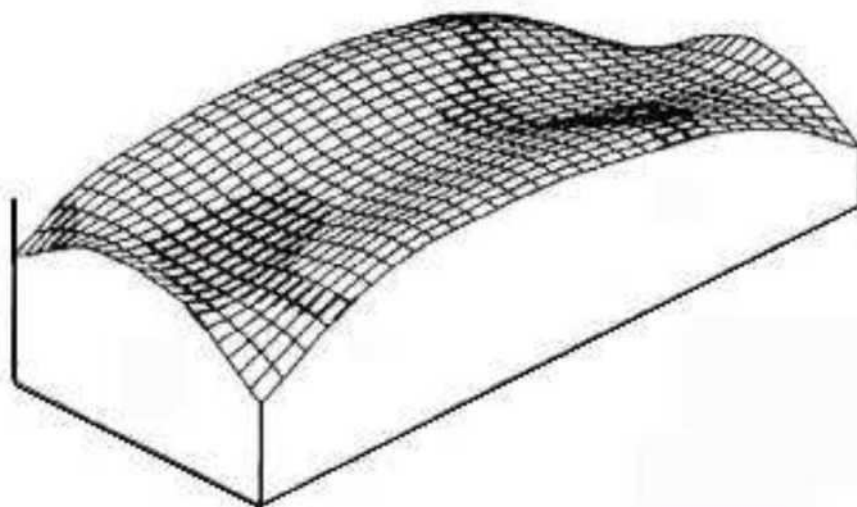


Рисунок 1.22 - Конфигурация зеркала металла на промышленном электролизере

Колебания значений некоторых других параметров электролизера являются дополнительным источником формирования нестабильности МГД. В промышленных измерениях и теоретических расчетах нестабильность этого типа может включать следующие элементы:

- флуктуацию тока серии - 0,3-3,6 кГц;
- колебания напряжения при анодном эффекте - 1,0 Гц-2,0 кГц;
- влияние газогидродинамических процессов (ГГД) - 1-35 Гц;
- образование и сход газовых пузырьков анодных газов - 1-3Гц;
- капиллярные волны по поверхности расплава, обусловленные силами поверхностного натяжения и представляющие собой «рябь» на поверхности раздела металл/электролит - 0,3-2,0 Гц;

– нарушения распределения тока в катоде (осадки, коржи) - 0,030,25 Гц;

– колебания поверхности раздела металл/электролит -0,02-0,05Гц.

Взаимодействие МГД и газогидродинамических (ГГД) процессов

– имеет сложный характер, особенно для электролизёров с самообжигающимися анодами.

Усиление амплитуды металла вдоль границы анода может достигать важного значения в ванной комнате с верхним током питания, где размер анода во много раз больше, чем в ванне ОА.

Достаточно большое количество газа, вдоль границы анода, вызывает вертикальную прокрутку металла, особенно вдоль границы анода.

Частота нарушения разряда газового воздействия равна 1 Гц, что на ранг выше, чем частота нарушения, возникающего от электромагнитной силы.

Согласно существующей концепции «быстрые волны, вызванные выбросом газа, как будто они движутся на медленной волне, которая вращается», из-за неподвижных сил МГД, то есть происходит так называемое «наложение волн».

Таким образом, возникновение МГД-нестабильности имеет сложную и противоречивую природу и является результатом взаимодействия газогидродинамических и магнитогидродинамических процессов.

Для сокращения незавершенного производства, и устранения явления МГД-нестабильности следует добиваться максимальной смачиваемости катодных блоков.

Это даст возможность металлу равномерное распределение на подине, даже в небольшом количестве.

[Изъято 29 страниц]

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

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель магистерской  
программы

Н.В. Белоусова  
подпись инициалы, фамилия  
« 07 » 07 2020 г.

**Магистерская диссертация**

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

код и наименование магистерской программы

Снижение удельного расхода электроэнергии при производстве

алюминия

тема

Научный Руководитель А.И. Рюмин к.т.н., доцент А.И. Рюмин  
подпись, дата должность, уч. степень инициалы, фамилия

Выпускник Е.Н. Побежимов  
подпись, дата инициалы, фамилия

Рецензент Старший мастер СК№3  
А.Э.Овчинников  
подпись, дата ПАО «РУСАЛ Братск» инициалы, фамилия

Консультант экономического  
раздела Т.В. Твердохлебова  
подпись, дата к.т.н., доцент инициалы, фамилия

Красноярск 2020