

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт цветных металлов и материаловедения

Кафедра металлургии цветных металлов

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор

Н.В. Белоусова

«_____» _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»

«Повышение энергетической эффективности алюминиевого электролизера за
счет снижения потерь теплоты в окружающую среду»

Руководитель	_____	канд. техн. наук, доцент
	Подпись дата	<u>Е.Д. Кравцова</u>
Консультант по экономической части	_____	канд. экон. наук, доцент
Магистрант	Подпись дата	<u>Т.В. Твердохлебова</u>
	_____	А.Ю. Столяров
Рецензент	_____	Начальник отдела департамент технологии и технологического развития алюминиевого производства САЗ
	Подпись дата	<u>В.Т. Асланов</u>

Красноярск 2020 год

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации по теме «Повышение энергетической эффективности алюминиевого электролизера за счет снижения потерь теплоты в окружающую среду» содержит 76 страниц текстового документа, в том числе 32 иллюстрации, 11 таблиц. Список использованных источников содержит 50 наименований.

Цель данного исследования – повышение энергоэффективности электролизёров при производстве первичного алюминия за счет снижения потерь теплоты в окружающую среду путем выбора оптимального варианта утепления анодного массива.

Для достижения поставленной были решены следующие задачи: проведен анализ известных решений по проблемам сокращения потерь тепла с электролизера; рассмотрена структура и состав различных теплоизолирующих материалов; собраны и обработаны технологические данные по основным показателям работы испытуемых электролизерах, с параллельным анализом данных электролизеров свидетелей; выполнен экономический расчет для подтверждения эффективности и целесообразности предлагаемых решений.

Произведено сравнение различных вариантов утепления анодного массива и их влияние на теплопотери с поверхности электролизера. Подобран оптимальный состав утепляющего материала и высота слоя засыпки анодного массива. Подтверждена эффективность утепления наружных боковых и торцевых стенок алюминиевого электролизера.

В рамках данного исследования, удалось добиться снижения напряжения на алюминиевых электролизерах, а, следовательно, снизить потери электроэнергии, что непосредственно привело к снижению себестоимости алюминия.

ЭЛЕКТРОЛИЗЕР, АЛЮМИНИЙ, ГЛИНОЗЕМ, АНОДНЫЙ МАССИВ, УКРЫВНОЙ МАТЕРИАЛ, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЯ.

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ	2
СОДЕРЖАНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Цель и задачи исследования	6
Методы решения задач	7
Ожидаемые результаты.....	7
1 Потери тепла от электролизера и их влияние на расход электроэнергии	8
1.1 Конструкции электролизеров с обожженными анодами	8
1.1.1 Анодное устройство электролизера с обожженным анодом	9
1.1.2 Катодный узел	10
1.2 Общий подход к расчету процессов перехода тепла в конструктивных элементах электролизеров	13
1.2.1 Теплопроводность	14
1.2.2 Конвективный теплообмен	15
1.3 Анализ предложений по снижению потерь теплоты с поверхностями алюминиевого электролизера	16
1.3.1 Тепловые потери, связанные с конструкцией электролизера	16
1.3.2 Потери тепла через верх ванны и укрытие анодного массива	18
1.3.3 Потери тепла через дно и борта электролизера	25
Выводы по разделу 1	28
2 Обзор Российских и зарубежных практик подбора материалов для оптимизации теплового баланса электролизеров	29
2.1 Состав и свойства укрывного материала	29
2.1.1 Состав укрывных материалов анодов	29
2.1. 2 Свойства укрывных материалов	31
2.1.3 Технологии подбора состава укрывного материала	35
2.2 Теплоизоляция электролизеров в верхней части футеровки	39
2.3 Регулирование тепловых потерь с поверхности катода	43
Выводы по разделу 2.....	44

3	Оптимизация гранулометрического состава, высоты утепления анодного массива и утепления боковых стенок электролизера	45
3.1	Сравнительный анализ температуры поверхностей укрывных материалов анодного массива и боковых стенок электролизера.....	45
3.2	Управление тепловым балансом за счет изменения высоты слоя засыпки укрывного материала	49
3.3	Влияние утепления торцевых и боковых стенок на форму рабочего пространства электролизера	54
3.4	Показатели проведенных испытаний по утеплению анодного массива, боковых и торцевых стенок электролизера	60
	Выводы по разделу 3.....	62
4	Технико – экономическая оценка предложенных мероприятий.....	64
	Расчёт финансовых результатов показателей эффективности мероприятия ...	67
	Рентабельность.....	68
	Выводы по разделу 4.....	69
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	71
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	72

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России одним из основных потребителей электроэнергии является алюминиевая промышленность. В производственном процессе затрачивается 12–14 и 15–16 тыс. кВт·ч электроэнергии для изготовления одной тонны металла в электролизерах с предварительно обожженным и с самообжигающимся анодами.

Повышение энергоэффективности производства является одним из приоритетов компании РУСАЛ, так как на сегодняшний день, при производстве алюминия, именно на электропотребление приходится около 30-40% затрат. Таким образом, уменьшив долю расходов на электроэнергию, снизится себестоимость конечного продукта, что приведет к повышению конкурентоспособности продукции на рынке.

При проектировании новых установок для производства алюминия основной тенденцией является использование электролизеров с предварительно обожженными анодами.

В электролизерах серии С-255, для производства алюминия с предварительно обожженными анодами, становится практикой создание энергоэффективных технологий, работающих за счет решений, обеспечивающих максимальное утепление электролизеров. Так, управлять тепловым балансом электролизеров можно за счет увеличения высоты укрытия, что приводит к снижению теплоотдачи в окружающую среду. При этом, для оптимизации силы тока и повышения энергоэффективности электролизеров, сохраняется возможность максимально снизить межполюсное расстояние.

Как одна из частей потерь тепла в алюминиевом электролизере рассматривается и катодное устройство. Потери тепла от нижней поверхности катодного кожуха относительно невелики и составляют от 6 до 7% от общего потребления энергии. Однако величина этих потерь в значительной степени ограничивает температурное поле в катодном устройстве, точнее расположение изотерм в кирпичной и угольной футеровке. Это связано с температурой

замерзания электролита, вероятность проникновения которого в верхние слои покрытия всегда существует. Одним из решений, позволяющим управлять тепловым балансом электролизера, является нанесение на определенные участки наружной поверхности катодного устройства войлок муллитокремнеземистый. Покрытие такого типа приведет к уменьшению объема подовых настывлей, что благотворно повлияет на технологические и энергетические режимы работы электролизера.

Таким образом, снижение доли затрат на электроэнергию при производстве электролиза является прямым способом снижения себестоимости конечного продукта и повышению конкурентоспособности продукции на рынке. Научные исследования, по сокращению энергопотребления при производстве первичного алюминия, за счет снижения потерь тепла в окружающую среду являются актуальными, так как обеспечивают уменьшение энергетических затрат на единицу производимой продукции и приводят к снижению расхода материальных ресурсов.

Цель и задачи исследования

Цель данного исследования – выбор оптимального варианта утепления анодного массива, для снижения потерь теплоты в окружающую среду и повышения энергоэффективности электролизёров при производстве первичного алюминия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ известных решений по проблемам сокращения потерь тепла с электролизера;
- провести анализ структуры и состава различных теплоизолирующих материалов;
- собрать и обработать технологические данные на испытуемых электролизерах, с параллельным анализом данных электролизеров свидетелей;

- выполнить экономический расчет для подтверждения эффективности и целесообразности предлагаемых решений.

Методы решения задач

Для решения поставленных задач планируется:

- провести анализ современной технической литературы в выбранном направлении исследований;
- сравнить различные варианты утепления анодного массива и их влияние на теплотери с поверхности электролизера.

Ожидаемые результаты

После реализации планируемых мероприятий в рамках данного исследования, предполагается добиться снижения напряжения на алюминиевых электролизерах, а, следовательно, снизить потери электроэнергии, что непосредственно приведёт к снижению себестоимости алюминия.

1 Потери тепла от электролизера и их влияние на расход электроэнергии

Процесс производства алюминия требует больших объемов электроэнергии. В производстве алюминия потребление энергии составляет от 30 до 40% затрат. Высокое потребление энергии при производстве алюминия является следствием низкой энергоэффективности алюминиевых электролизеров, не превышающей 45%, при которой значительная часть потребляемой энергии рассеивается по его поверхности в виде тепла в окружающую среду. [1]. Тепловые потери и в целом тепловой баланс электролизера, зависят от конструктивных особенностей электролизера. В алюминиевой промышленности сохраняется устойчивая тенденция к переходу на электролизеры с предварительно обожженными анодами. Далее рассмотрены основные конструктивные особенности и способы управления тепловыми балансами этого типа электролизеров.

1.1 Конструкции электролизеров с обожженными анодами

Современные электролизеры могут иметь различные конструкции, по принципу работы анодного устройства выделяют два основных типа: с самообжигающимся анодом и обожженными анодами. На электролизере любого размера, конструкции и мощности можно выделить следующие основные компоненты (см. рисунок 1): анодное и катодное устройство, ошиновка для источника питания и систему сбора и очистки газа.

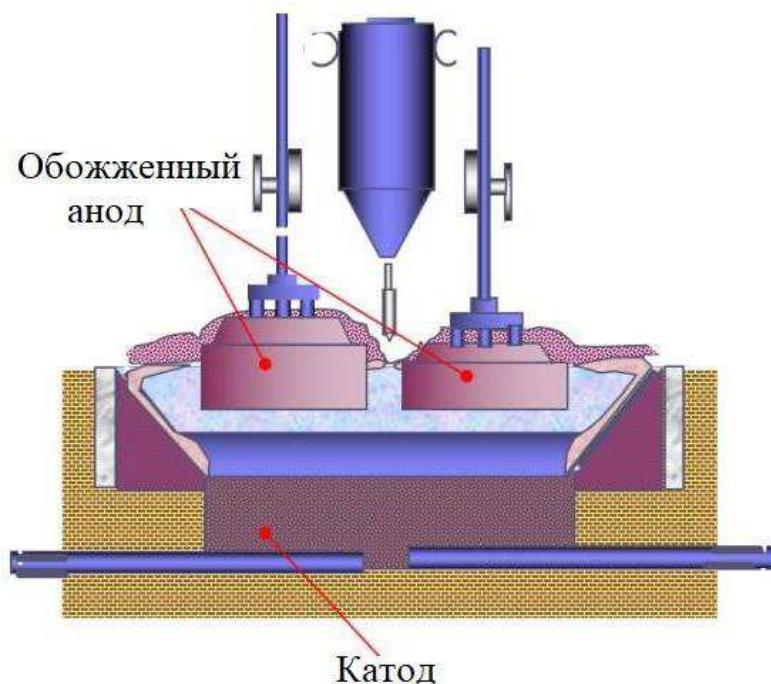
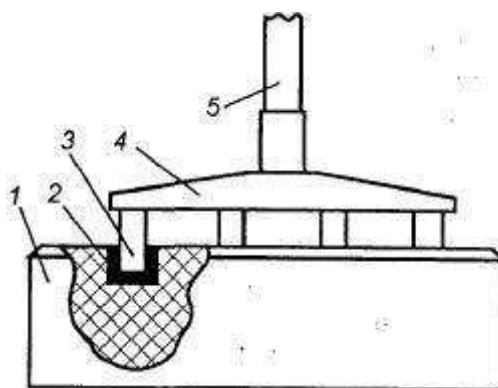


Рисунок 1 – Схема электролизера для производства алюминия с предварительно обожженными анодами

1.1.1 Анодное устройство электролизера с обожженным анодом

Анодный узел представляет собой анодный массив, состоящий из двух параллельных рядов обожженных анодов. Анодное устройство схематично представлено на рисунке 2, оно состоит из анодного блока, в котором имеется гнезда для ниппелей.



1 – угольный обожженный блок; 2 – гнездо с чугунной заливкой; 3 – токоподводящий ниппель; 4 – кронштейн; 5 – алюминиевая несущая и токоподводящая штанга.

Рисунок 2 – Анодное устройство

Кронштейн с анодным блоком соединен специальной чугуновой заливкой. С другой стороны, кронштейн приварен к алюминиевой штанге. Контакт между штангой и алюминиевой шиной осуществляется прижимным замком. Шины крепятся к домкратам подъемного механизма, которые закреплены на анодной балке-коллекторе. К нижней части балки-коллектора приварены поперечины, на которые упираются створчатые укрытия электролизера, выполненные из листового алюминия. По мере сгорания подошвы анодного массива, анодная рама опускается, и таким образом поддерживается необходимое междуполюсное расстояние (МПР). Рама, опустившаяся до нижнего значения 50 мм, должна быть перетянута. Сгоревшие аноды, огарки, меняются на новые аноды в соответствии с циклом замены анодов.

Обожженные аноды в ванне располагаются в два ряда, и утепляют, полностью засыпая их сверху глиноземом.

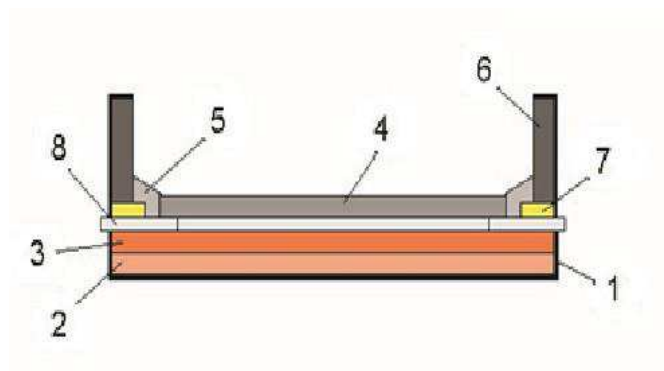
1.1.2 Катодный узел

Катодный узел – один из элементов алюминиевого электролизера, который служит для размещения металла и электролита, отвода тока и тепла. Катодное устройство должно удовлетворять комплексу взаимосвязанных технологических, экологических, химических, тепловых, магнито-гидродинамических, механических и электрических условий. Конструирование катодного узла – это поиск оптимальных решений, обеспечивающих минимальные затраты при производстве алюминия, включая капитальные затраты на изготовление катодных узлов.

Катодное устройство электролизеров (см. рисунок 3) включает: стальной кожух, усиленный ребрами различной конструкции, теплоизоляцию (вермикулит или диатомит), огнеупорную часть (обычно шамот) и углеродное корыто – антрацитовые или графитовые блоки, связанные массой, забитой в пазы.

В новых конструкциях ванн бортовые блоки изготавливаются из карбидокремниевых плит. Блоки устанавливаются на кирпичную или бетонную бровку. Ток от блоков отводится стальными стержнями (блюдсами).

В катодном устройстве утеплена подина, чтобы не допускать образования плохо проводящих ток солевых слоев, и разутеплены борта, чтобы создать гарнисаж и настыль и тем самым защитить бортовую футеровку от воздействия электролита.



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

Рисунок 3 – Схема катодного устройства

Катодный кожух алюминиевого электролизера во многом определяет тепловое состояние и целостность внутренних элементов (подины, футеровки). В процессе обжига, пуска и пускового периода катодный узел находится под воздействием сил, связанных с термомеханическим напряжением внутренних элементов. Требование к жесткости конструкции приводит к необходимости использования дополнительных элементов: шпангоутов или контрфорсов. Применение элементов жесткости приводит к увеличению теплообмена с окружающей средой, за счет увеличения поверхности днища.

Подина выполняет две функции: она является огнеупорным контейнером для расплавленного металла и электролита и проводит электрический ток. Угольная подина состоит из набора подовых секций, каждая из которых состоит из блоков с пазом, внутри которого монтируется стальной стержень – блюмс,

выполняющий функции токоотвода. Для снижения механических напряжений в пазах возможно применение компенсирующих прокладок, состоящих из высокотемпературных электропроводных сжимаемых материалов, при использовании углеродистого войлока и ткани толщиной 3,5 мм [2]. Применение в пазах набивных масс способствует улучшению механических свойств для подовых блоков [3]. Как правило, чаще всего применяются следующие катодные секции: с длинным блоком, перекрывающим всю ширину подины или с использованием двух секций по ширине подины. Широкое распространение имеют аморфные блоки с кальцинированным или электрокальцинированным антрацитовым наполнителем, но в большинстве случаев, все-таки используют графитированные и графитизированные подовые блоки. Расстояние между подовыми секциями, межблочные швы, заполняют набивной массой, которую затем трамбуют. Аналогично заполняют пространство между подовыми секциями и бортовыми блоками, периферийные швы. Во время обжига данные швы спекаются, и становится невозможным протек расплава в межблочное пространство.

Бортовые блоки изготавливают из углеграфитовых материалов, они не являются токоведущими элементами, и имеют низкую электропроводность. Бортовые блоки выполняют функцию защиты металлического кожуха от воздействия расплава и фтор солей. Они должны быть химически пассивными относительно расплавов алюминия и электролита, стойкими к окислительной среде, механически прочными, не смачиваемыми, непроницаемыми, стойкими к термоудару и иметь оптимальную теплопроводность. На практике себя зарекомендовали блоки, выполненные из карбида кремния, их преимущество – это низкая окисляемость, химическая пассивность. Плотность плит равна 2,5–2,6 т/м³, предельная температура составляет 1450–1600 °С. Значительное механическое воздействие, бортовые блоки испытывают при обжиге, а особенно при пуске – со стороны подины и катодного кожуха. Между бортовым блоком и кожухом оставляют зазор, заполняемый шамотной крошкой. Такой зазор

называется температурный шов, он несет функцию теплоизоляции, приводящей к снижению тепловых потерь и к повышению температуры бортового блока.

Огнеупорная футеровка служит основанием для подовых блоков, и защищает теплоизоляционный слой от расплавленного алюминия. Она состоит из нескольких слоев алюмосиликатных и углеродсодержащих огнеупоров. Чаще всего футеровку цоколя выкладывают кирпичами из плотного шамота, при его пропитке теплопроводность увеличивается, и температура футеровки повышается. К огнеупорной футеровке так же относится бровка, которая несет функцию основания для бортовых блоков по периферии катодного кожуха. Качественно выполненная бровка, значительно уменьшает число протеклов расплава через блюмсовые окна.

Теплоизоляция цоколя – это пористый материал, который переносит тепловые и механические нагрузки, зачастую ими являются пенодиатомит и пеношамот. Теплоизоляция цоколя отвечает за энергетическую эффективность электролизера, влияет на тепловое состояние, образование настывли, при которых материалы бортовых блоков и периферийного шва будут максимально защищены от расплава. Во многом срок службы, энергозатраты и целостность катода определяется качеством применяемых материалов.

1.2 Общий подход к расчету процессов перехода тепла в конструктивных элементах электролизеров

Сложная конфигурация поверхностей теплообмена, различные условия движения газов, которые моют поверхности, и параметры лучистого обмена часто усложняют определение процесса теплообмена структурных элементов ячейки в пространстве. Кроме того, основные ошибки, возникающие при определении температуры теплообменных поверхностей и теплофизических характеристик изоляционного материала, усложняют расчет потерь.

Элементарные типы теплообмена, такие как теплопроводность, конвекция и тепловое излучение, не изолированы и редко встречаются в чистом виде. В

большинстве случаев один тип теплообмена сопровождается другим. Давайте кратко рассмотрим каждый из этих методов передачи тепла.

1.2.1 Теплопроводность

При различной температуре вещества находящегося в разных агрегатных состояниях, тепло передается самопроизвольно из более высокой области в область с более низкой температурой. Данный процесс принято называть теплопроводностью. Тепло, которое проходит через изометрическую поверхность за определенное количество времени, называют тепловым потоком Q . Отношение теплового потока к единице поверхности – это плотность теплового потока q .

Потери тепла для плоской однослойной стенки из – за теплопроводности рассчитываются на основании закона Фурье по формуле

$$Q_T = qF = \lambda F (t_1 - t_2)/\delta,$$

где F – площадь поперечного сечения теплового потока, m^2 ; t_1 – температура нагретой поверхности; t_2 – температура более холодной поверхности; λ – коэффициент теплопроводности, $kJ/(m \cdot s \cdot ^\circ C)$; δ – толщина стенки, m .

Коэффициент теплопроводности λ характеризует количество тепла за определенную единицу времени с градиентом температуры один протекающей через единицу площади изометрической поверхности. В результате соотношения вылечены коэффициента теплопроводности λ к толщине стенки δ рассчитывается теплопроводность стенки, а обратное действие данного расчета показывает термическое сопротивление.

Многослойные стены состоят из нескольких разнородных слоев. Такие стены являются шахтами алюминиевых электролизеров. Чтобы рассчитать потери тепла из близко расположенных слоев от стены состоящей из n слоев можно применить уравнение

$$Q_T = kF (t_1 - t_2),$$

где $k = 1/(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \dots + \delta_n/\lambda_n)$ – коэффициент теплопередачи, кДж/(м²·ч·град). Здесь $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – толщины слоев; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ – коэффициенты теплопроводности слоев.

Числовые показатели коэффициентов теплопроводности материалов, применяющихся в алюминиевой промышленности, представлены в таблице ниже.

Таблица 1 – Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов, применяющихся в алюминиевой промышленности

Материал	λ кДж/(м·ч·град)
Алюминий	$355 + 57 \cdot 10^{-3}t$
Глинозем	$0,59 + 0,58 \cdot 10^{-3}t$
Графит	$585,8 - 146,4 \cdot 10^{-3}t$
Бортовые блоки	$33,18 - 7,53 \cdot 10^{-3}t$
Подовые прошивные блоки	$40,33 - 7,86 \cdot 10^{-3}t$

Из обзора многочисленных литературных источников можно сделать вывод, что теплопроводность анодов варьируется в диапазоне 2,5–5 Вт/(м·°С), теплопроводность корок может изменяться от 0,9 до 1,6 Вт/(м·°С) [4, 5, 6]. Потери тепла от поверхности укрытия, состоящего из смеси дробленого электролита и глинозема, составляет 4–5,4 кВт/м² [4], от поверхности укрытия, состоящего только из глинозема – 3,9 кВт/м² [5].

1.2.2 Конвективный теплообмен

Процесс теплообмена между поверхностью тела в разных агрегатных состояниях называется конвективным теплообменом или просто теплообменом. В данном процессе теплопередача неразрывно связана с переносом самой среды. По этой причине конвекция может происходить только в газах и жидкостях, частицы которых легко перемещаются.

Для расчета потерь тепла конвекцией с наружных стенок электролизера применяется формула Ньютона – Рихмана

$$Q_k = \alpha_k(t_c - t_b)F,$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией от стенки к газу и наоборот, кДж/(м²·ч·град); t_c и t_b – соответственно температура стенки и среды воздуха, °С; F – теплоотдающая поверхность, м².

Основным методом расчета α_k был метод, основанный на теории подобия. Для случая неограниченной конвекции пространства со свободной циркуляцией воздуха для вертикальной плоской стенки, то есть в случае потери тепла через вертикальные стенки электролизера, наиболее простым и достаточным для вычисления α_k является выражение.

$$\alpha_k = A\Delta t^{1/3},$$

где Δt – разность температур стенки и среды, °С; A – коэффициент, зависящий от свойств среды и определяющей температуры, под которой понимают $t_T = 0,5(t_c + t_b)$.

1.3 Анализ предложений по снижению потерь теплоты с поверхностями алюминиевого электролизера

1.3.1 Тепловые потери, связанные с конструкцией электролизера

По итогам проведенного анализа можно сделать вывод, что только около 20% тепла используется в производстве. Часть тепла преимущественно используется в производстве, для поддерживая электролита и металла в расплавленном состоянии, нагревая глинозем и углерод, способствуя растворению глинозема, а остальное тепло теряется в окружающей среде. В связи с высокой стоимостью электроэнергии, строение электролизера должно быть спроектировано так, чтобы сократить потери тепла.

Для определения тепловыделения на электролизере используются параметры плотности тока и межполюсное расстояние или (МПР). Это означает, что для существующего электролизера, имеющего определенную конструкцию, силу тока, размер анода и теплоизоляцию, потери тепла зависят главным образом от рабочего напряжения или, по сути, от МПР. С существующей технологией

МПП невозможно уменьшить менее 4 см, чтобы избежать коротких замыканий и интенсивной обратной реакции между алюминием и диоксидом углерода, что может вызвать большие потери выхода по току. Таким образом, МПП становится основным ограничивающим фактором, определяющим максимальную теплоизоляцию электролизера.

Энергетический баланс обеспечивает стабильное равенство между потреблением и расходом энергии, а также соответствие между средним напряжением в ванне и потреблением энергии для электрохимического процесса и компенсацией тепловых потерь. Если такое равновесие (равновесие) устанавливается при оптимальном значении МПП и соответствует максимальной производительности электролизера с низким удельным энергопотреблением, то это лучше всего соответствует требованиям технологии и экономическим интересам производства.

Дисбаланс может возникнуть, если подача энергии уменьшается относительно равновесных значений. Это может произойти, например, если рабочее напряжение и ток рабочего напряжения занижены, частота анодных эффектов уменьшается и т. д. Реакция на такие изменения также является саморегулирующей электролизера, который направлен на увеличение тепловых потоков от ванны за счет увеличения толщины слоя настывлей.

За последние несколько лет тепловые потери от электролизера были значительно снижены за счет оптимизации теплоизоляции днища и боковых сторон катода. Конструкция электролизера должна быть такой, чтобы правильно поддерживать правильную температуру электролита, а тепловой поток должен быть достаточным для поддержания слоя настывля на поверхности пластин для их защиты. Крайне важно, чтобы затвердевший электролит покрывал периметр подины, чтобы минимизировать влияние горизонтального тока на металл катода.

Если нижняя часть катода недостаточно изолирована, это может привести к образованию длинных подовых настывлей, которые нарушают циркуляцию металла и повышают рабочее напряжение.

От 40 до 60 % тепловых потерь приходится на верхнюю часть электролизера с обожженными анодами. Типичное распределение потерь тепла на электролизере с обожженными анодами представлено на рисунке 4 [7, 8].

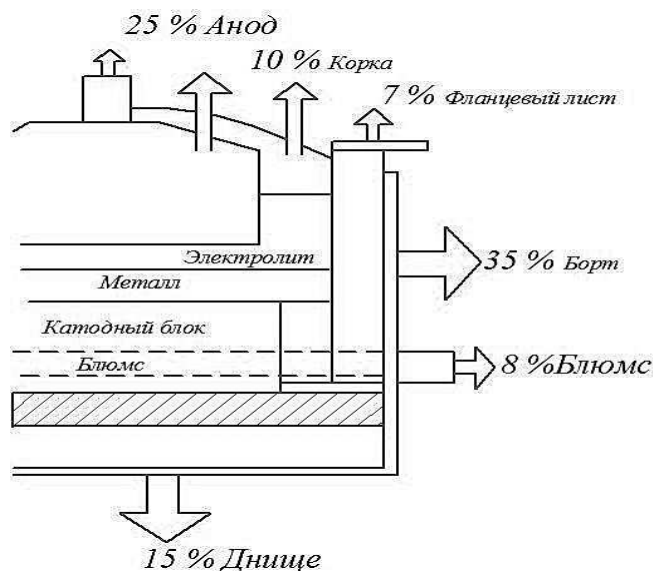


Рисунок 4 – Типичное распределение потерь тепла на электролизере с обожженными анодами

Зона большого потенциала для энергосбережения, особенно из-за увеличенной засыпки верхней части анода и корки глиноземом, является верхней частью электролизера, которая включает аноды, анодные штанги и корку на поверхности расплава. Уменьшение потерь тепла может быть достигнуто за счет уменьшения размера электролизера. Потери тепла зависят от площади поверхности, а объем связан с производительностью, поэтому отношение потерь тепла к полезному потреблению энергии уменьшается с увеличением тока электролизеров [9]. Отсюда следует, что снижению тепловых потерь способствуют электролизеры с лучшей геометрией, рассчитанные на большую силу тока [10].

1.3.2 Потери тепла через верх ванны и укрытие анодного массива

Работа по решению проблемы, связанной с оптимальным укрытием анода, проводится практически на всех предприятиях ОК РУСАЛ, у которых есть

электролизеры с обожженными анодами. (ОА). Подготовка и нанесение хорошего анодного покрытия чрезвычайно важны для эффективной работы современного электролизера с обожженными анодами. Для защиты анодов от окисления на воздухе и минимизации теплотерь электролизера необходима однородная смесь измельченного электролита и глинозема, а также относительно надежный приемлемый и воспроизводимый способ применения.

Тепловой баланс электролизера определяет стабильность и эффективность электролизера. Рассеяние определенного количества тепла, которое рассеивается от анода, может быть уменьшено путем изменения количества укрывного материала, который используется для поддержания температуры металла и электролита.

На практике лучший способ контролировать потери тепла от ОА ванны сверху - это изменить толщину слоя глинозема в верхней части коры, вид анодного массива, с различной толщиной укрывного материала представлен на рисунке 5.



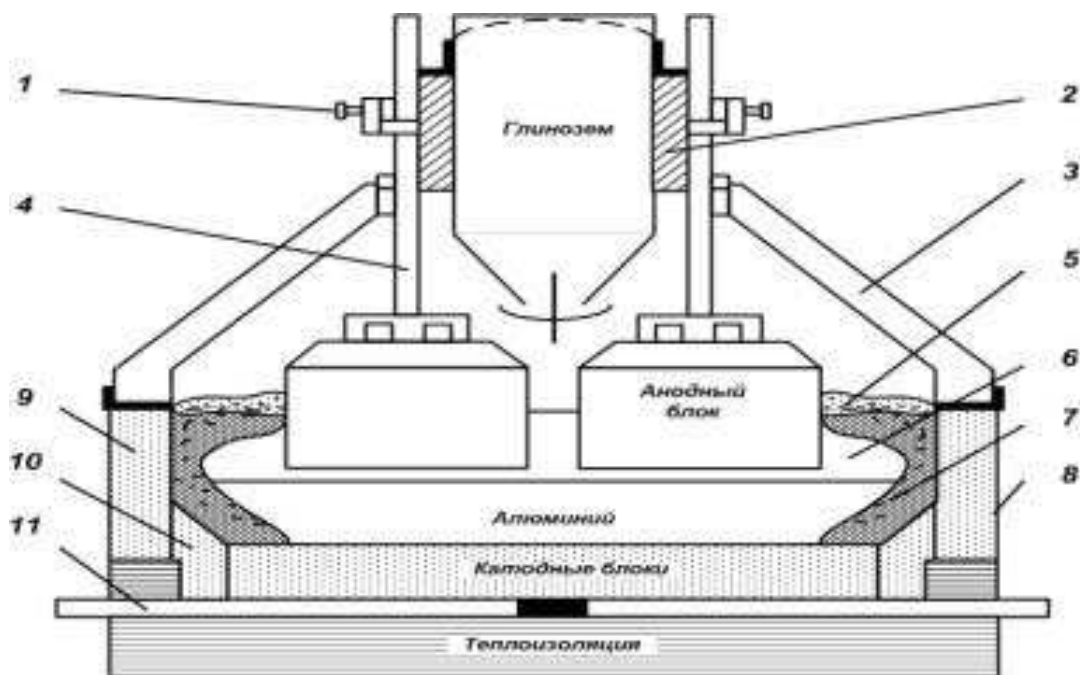
Рисунок 5 – Состояние анодного массива, с различной толщиной укрывного материала

Защита анодов от окисления определяется также толщиной укрытия - высотой насыпи. При полном отсутствии укрытия масса анода уменьшается более чем на 50% от его среднего значения. Промышленной практикой установлено, что минимальная толщина укрытия анодного массива должна

составлять от 7 до 10 см, при меньшем значении окисление боковых поверхностей резко возрастает, а верхняя часть горит анод при окислении ниппелей. Поднятие слоя засыпки на высоту более 10 см увеличивает теплоизоляцию массива, и, при вынужденном снижении силы тока, позволяет поддерживать тепловой баланс.

Теплопроводность гранулированных материалов зависит типа материала и его структуры – от пористости и распределения частиц по размеру. Небольшие фракции с низкой объемной плотностью, независимо от того, состоят они из электролита или глинозема, обеспечивают изоляцию (средняя теплопроводность – 0,3–0,4 Вт/м·°С). Гранулы смеси электролита и глинозема с размерами в пределах 1–10 мм могут образовывать плотную засыпку с более высоким уровнем теплопроводности (до 1,5 Вт/м·°С) [11]. Это, как и толщина слоя укрытия, имеет существенное значение с точки зрения поддержания теплового баланса ванны. Теплопроводность в течение определенного интервала времени может измениться, что зависит от степени фильтрации или отверждения электролита, что зависит от плавления покрывающего материала, в результате чего сплав заполняет промежутки и полости между частицами.

Укрытие анодной массива электролизера образовано кристаллической коркой, образованной на поверхности [12], которая со временем отрывается от поверхности электролита и, увеличиваясь по толщине со слоями глинозема, связывается с гарнисажем, сжимаясь по всей периферии катодного устройства. Ниже, (см. рисунок 6) представлен разрез электролизера и анодного укрытия. Укрытие представляет собой арку, её края опираются на верхнюю часть гарнисажа, и частично на фланцевый лист стального катодного кожуха [13]. Опора представляет собой правильно сформированной бортовой настелью с крутым уклоном, а основанием подовая настель, который создает форму рабочего пространства (ФРП).



1–контактный зажим; 2 – анодная шина; 3 – укрытие; 4 – токоподводящая штанга; 5 –
 укрывной материал; 6 – электролит; 7 – гарнисаж; 8 – катодный кожух; 9 – бортовая
 футеровка; 10 – подовая масса; 11 – катодный блюмс

Рисунок 6 – Поперечный разрез электролизера и анодного укрытия

На высокоамперных электролизерах в качестве укрытия применяется два типа укрывного материала (УМ), различающихся по составу: первичный УМ и вторичный УМ.

Первичный укрывной материал анода используется для создания подсыпки анодных блоков после замены анода в ванне. Он состоит из смеси твердого оборота и глинозема, и содержит частицы с размером от очень тонкой пыли (<45 мкм) до мелких, средних или даже крупных (рисунок 7 а; б).



а)

б)

Рисунок 7 – материалы для укрытия анодного массива: глинозем (а); дробленый электролит (б)

Вторичный укрывной материал анода состоит из спеченного твердого материала с нижней части анодного укрытия и рыхлого, пыльного материала - с верхней части корпуса анода.

- Как компоненты для укрытия анодного массива могут использоваться:
- материал для очистки полости после удаления отработанного анода, который состоит из осадка и осадка после очистки дна катода, а также кусков крышки анода, которые падают на поверхность расплава во время работы электролизера, и этот материал содержит относительно высокая доля твердого криолитового расплава;
- чистый электролит, который можно удалить из ванны в избытке или непосредственно приготовить заранее;
- вторичный глинозем из систем пыле- и газоочистки предприятия.

Отсюда следует, что для обеспечения стабильной работы электролизера с высоким усилителем необходимо оптимальное соотношение всех компонентов, поскольку они определяют эффективность, с которой УМ будет выполнять свои функции, включая:

- необходимость использования оборотного электролита;
- защита анода от окисления воздухом, а также частично от окисления CO_2 ;

- термоизоляция от потерь тепла через верхнюю поверхность анодов;
- формирование стабильных и плотных перемычек из корки между анодными блоками и по периметру;
- улавливание летучих фторидов, таких как NaAlF_4 и AlF_3 [14, 15];
- баланс состава электролита в электролизной ванне, то есть компенсация удаленного электролита адекватной добавкой электролита, и поддержание заданного целевого уровня электролита;
- устойчивость укрывного материала при погружении анода в электролит и коррозии ниппелей анододержателя в жидком электролите во время ликвидации анодного эффекта и отклонений технологического режима.

К современному укрывному материалу предъявляются следующие требования [16, 17]:

- низкий уровень проницаемости воздухом и газами;
- оптимальная теплопроводность по высоте слоя;
- необходимый для фиксирования арки укрытия угол естественного откоса.

Ранее на электролизерах средней мощности ОА (160-170 кА) материал очистки лунок не удалялся из ванны и не подвергался обработке, а только сдвигался к стенкам ванны, поэтому основной укрывной материал анода традиционно состоял примерно из 50% криолита и 50% глинозема. Количество измельченного вторичного материала покрытия анода было слишком мало для стабильного покрытия анодов, поэтому для обеспечения достаточного количества материала покрытия к первичному материалу пришлось добавить большое количество глинозема.

Таким образом, количество глинозема в исходном материале, покрывающем аноды, вместе с регулированием теплового баланса и его концентрацией в электролите, является эффективным средством поддержания необходимого уровня электролита. Подсчитано, что в электролизном производстве 30% первичного материала используется для покрытия анодов, остальное-для покрытия свободное пространство вокруг них, в том числе его

частичный контакт с электролитом. Около половины материала покрытия вокруг анодов обычно растворяется при движении электролита в ванне. Этот электролитный баланс может существенно измениться, если вторичный материал покрытия анода растворится или станет жидким во время устранения анодного эффекта или, когда анод, как анодный массив в целом будут опущены. В результате технологических действий и операций повышение уровня жидкого электролита выше целевого значения может привести к ошибочному циклу, так как он инициирует дальнейшее растворение вторичного материала. В таких случаях, как нежелательный набор электролита при заливке металла, контроль состояния укрытия анодов, отвода огней, высоту уровня электролита следует компенсировать добавлением жидкого электролита или вводом твердого циркулирующего электролита. Избыток криолита, образующийся в результате реакции между оксидом натрия в первичной окиси алюминия и фторидом алюминия [18], обычно удаляется из ванны с помощью специального технологического ковша для заливки электролита (емкостью 5 т) для обеспечения запасов материала. вторичное покрытие и материал для чистки лунок.

Из этого следует, что баланс Na_3AlF_6 в электролизных ваннах регулируется изменением содержания глинозема в первичном укрывном материале. Избыточные количества чистого электролита после операций выливки металла возвращают в корпуса электролизного производства [19].

Большая часть примесей в первичном покровном материале образуется при обратной засыпке рабочих анодов. Значения пределов содержания некоторых примесей в первичном укрывном материале приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Пределы содержания примесей в первичном укрывном материале

Примесь	Пределы содержания, %
Углерод	0,6 – 3
Fe_2O_3	0,25 – 0,65

SiO ₂	0,3 – 0,6
P ₂ O ₅	0,008 – 0,016
V ₂ O ₅	0,002 – 0,004
NiO	0,02 – 0,04

Содержание примесей снижается при смешивании вторичного укрывного материала с полученным сырьем после очистки дна электролизера при замене анода, фторированного глинозема и чистого электролита. Обычно их значения в первичном покровном материале анода указывают либо на проблемы в обслуживании и эксплуатации с повышенным содержанием примесей, либо на высокие технологические показатели электролизеров и анодного производства с низким содержанием примесей [20].

В качестве приемлемого показателя можно рассматривать содержание углерода, составляющее примерно 0,5 %, в первичном укрывном материале. Содержание 1–2 % недопустимо [21]. Наличие углерода во вторичном глиноземе в количестве 0,1-0,2 % способствует увеличению содержания углерода в первичном УМ, в то время как основная часть углерода в первичном укрытии медленно окисляется воздухом на глубину около 15 см.

Примеси железа, попадающие в электролит, снижают качество первичного алюминия. После каждой смены анодов, железо попадает с УМ после чистки огарка. Поэтому, на стадии дробления корки, удаление окисленного железа может быть достигнуто с помощью магнитных сепараторов.

1.3.3 Потери тепла через дно и борта электролизера

С поверхности днища ванны тепло теряется в окружающую среду является составляет около 15% от общего потребления энергии. Эти потери связаны в основном с теплопроводностью, которая зависит от теплового сопротивления футеровочного материала. Это связано с температурой замерзания электролита, проникновение которых в верхние слои покрытия неизбежно процессы.

Положение изотермы, соответствующее температуре замерзания электролит, в верхних слоях футеровки можно заморозить расплав, проникает под катодные блоки и предотвращает разрушение воздействием солей фтора. Это особенно важно во время использования высоких теплопроводных графитовых подовых блоков. Однако изотерма кристаллизации не должна распространяться на поверхность подины, потому что это приведет к формированию подовых настывлей.

Так же, по мнению Utigard T., Toguri J.M., была выведена зависимость температуры ликвидуса и эвтектики простого состава электролита. И из этих наблюдений было выявлено, что температура подины не должна быть ниже 953 °С, в противном случае образование коржей неизбежно [22].

Таким образом, при снижении температуры поверхности угольной подины на ней образуются «коржи», и, кроме того, определенная часть подины прикрыта непроводящим глиноземным осадком и подовыми настывлями (см. рисунок 8). Все вместе это приводит к неравномерному распределению тока между жидким алюминием и поверхностью подины [23].

Следовательно, это явление является дополнительной причиной неравномерного распределения тока в теле подины.

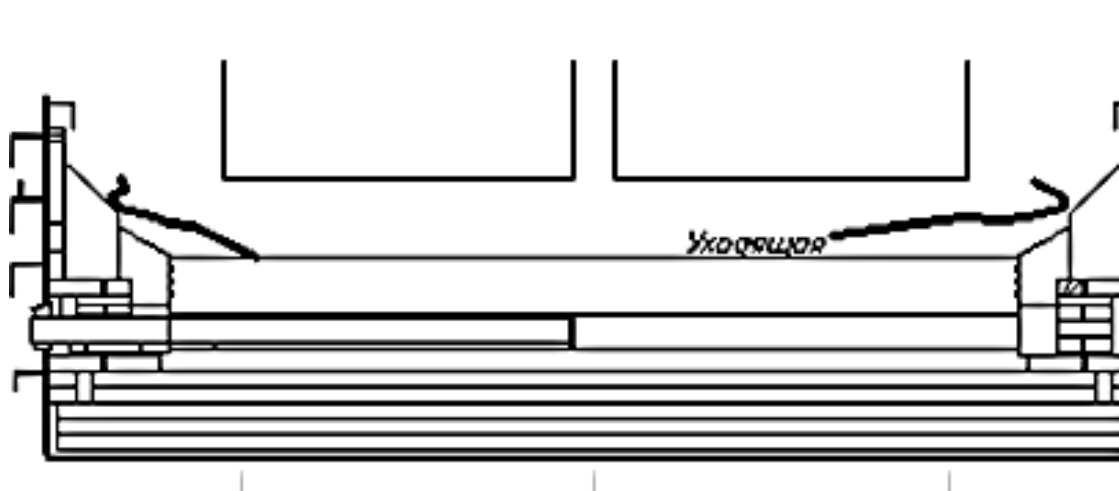


Рисунок 8 – Уходящая настывль под проекцию анода

Если стенки ванны имеют достаточно большую теплоизоляцию, часть углерода будет разрушена из-за химического воздействия, так как там нет нарастания и тепловое сопротивление значительно снижается. С другой стороны, если

элемент не имеет достаточной изоляции, настыль на боковой стенке будет увеличиваться до тех пор, пока в этом процессе не будет достигнуто равновесие. Это означает, что высокая температура в ванне, вызванная ошибками проектирования, автоматически компенсируется, и тепловой баланс восстанавливается. Разрушение углерода на боковой стенке может увеличить риск выхода из строя и создать аварийную ситуацию, но в то же время тонкая изоляция может затруднить техническое обслуживание электролизера и создать проблемы при замене анодов. Отработанное тепло проходит через бортовую настыль, боковой блок, изоляцию на стороне ванны, стальной корпус и на поверхности электролизера, где его можно измерить в воздушном пространстве, стального корпуса (рис. 9). Вы должны выбрать этот участок поверхности, а также предел теплового потока.

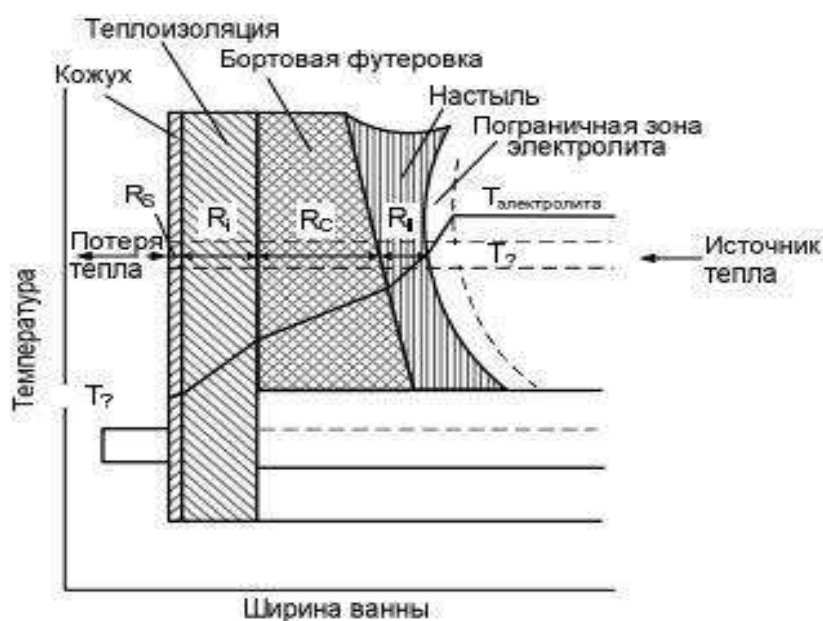


Рисунок 9 – Прохождение тепла через борт ванны

В источниках [24, 25] представлены разработанные динамические модели теплопередачи через бортовую футеровку.



Рисунок 10 – Схематичное представление электролизера для тепловых расчетов

Не смотря на то, что при моделировании процесса теплопередачи, как правило, берется схематичное представление электролизера, как это сделано, например, в работе [26] (см. рисунок 10), моделирование является чрезвычайно важным инструментом для проектирования боковых покрытий в новых ваннах и помогает принимать меры для экономии энергии.

Выводы по разделу 1

Рассмотрена принципиальная конструкция электролизеров с обожженными анодами, приведены типовые конструкции анодного устройства и катодного узла. Основной акцент сделан на подборе материалов и устройстве анодного укрытия.

Показана взаимосвязь между увеличением потерь тепла электролизера и повышенного расхода электроэнергии. Рассмотрен общий подход к расчету процессов перехода тепла за счет теплопроводности и конвективного теплообмена.

Показано влияние конструкции электролизера на тепловые потери через верх ванны и укрытие анодного массива, через дно и борта электролизера.

2 Обзор Российских и зарубежных практик подбора материалов для оптимизации теплового баланса электролизеров

2.1 Состав и свойства укрывного материала

2.1.1 Состав укрывных материалов анодов

Укрывной материал представляет собой смесь затвердевшего электролита и глинозема [27]. Охлажденные пробы электролита отечественных алюминиевых заводов имеют достаточно сложный фазовый состав [28 29], приведенный в таблице 3.

Таблица 3 – Фазовый состав охлажденного электролита

Фаза	Хим. формула
Криолит	Na_3AlF_6
Хиолит	$\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$
Кальциевый криолит 1	NaCaAlF_6
Кальциевый криолит 2	$\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{F}_{14}$
Флюорит	CaF_2
Веберит	$\text{Na}_2\text{MgAlF}_7$
Нейборит	NaMgF_3
Виллиомит	NaF
Глинозем	Al_2O_3
β -глинозем	$\text{NaAl}_7\text{O}_{11}$

Электролит состоит из смеси криолита и фторида алюминия, при затвердевании образующих двухфазную смесь хиолита и криолита. Третья фаза – глинозем, также присутствует, особенно в корочках, удаляемых с анодных огарков. Примерный состав электролита и корки [30] показан на рисунке 11.

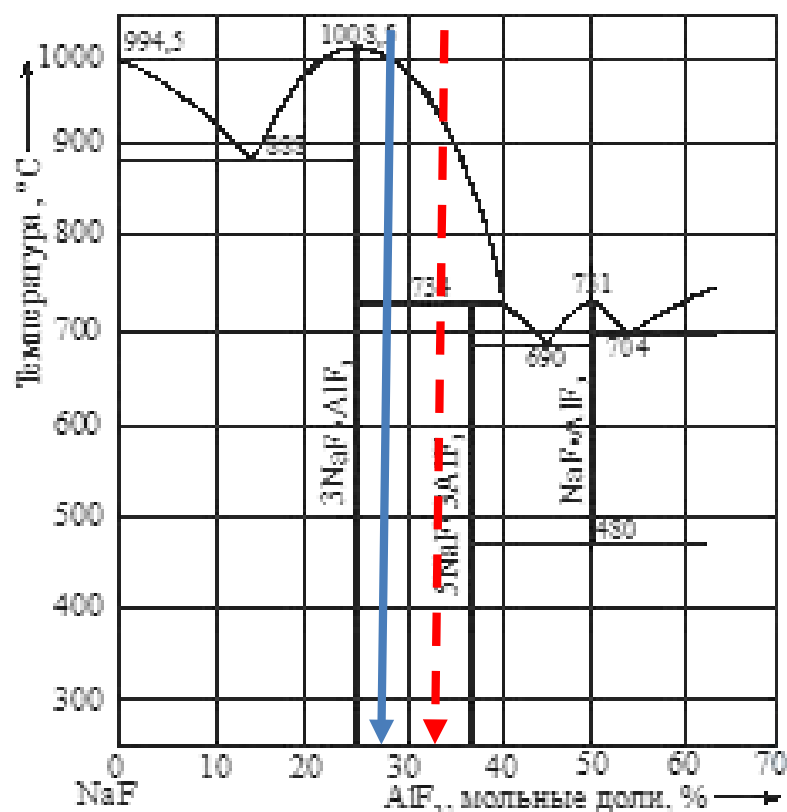


Рисунок 11 – Состав электролита (сплошная) и корки (пунктир) на диаграмме состояния двухкомпонентной системы NaF–AlF₃

Содержание хиолита в расплаве достигает 12 масс. %, в то время как в дробленом электролите – его содержание может достигать 70 масс. %.

На действующем производстве соотношение криолит-содержащего материала и свежего глинозема в укрывном материале анодного массива поддерживают исходя из следующих условий:

- возврат извлеченного криолит-содержащего сырья с огарков, обратно в электролизер;
- обеспечение необходимого количества покрывающего материала для поддержания заданной высоты укрытия анодного массива создается путем добавления свежего глинозема. Состав криолитоглиноземной шихты в укрывном материале анодного массива (содержание электролита, глинозема, пыли, сметок), а также крупность материала влияет на.

Состав криолит-глиноземного наполнителя (содержание глинозема, обратный криолит, пыль, смета, фториды, фторированный глинозем) в материале покрытия анодного массива в целом влияет:

- теплопроводность корки;
- питание электролизера, включая образование осадка;
- регулирование уровня расплава, так как низкое содержание глинозема приводит к увеличению содержания компонентов электролита;
- общую прочность корки вследствие переизбытка AlF_3 в укрывном материале.

2.1.2 Свойства укрывных материалов

Для создания укрытия часто используются мучнистые материалы, однако они пылят и их трудно закрепить на поверхности анода, поэтому излишки материала не спекаются, а стекают в ванну.

Укрытие из грубых фракций менее подвержено плавлению и его легче фиксировать на аноде. Термически материал также более стабилен, отчасти благодаря более высокому тепловому потоку, проходящему через укрытие.

Средние значения физических свойств, которые влияют на качественные характеристики материала покрытия, приведены в таблице 4. Материал покрытия, который имеет самый высокий процент (35-45%) крупных частиц электролита, имеет высокое значение плотности [31, 32].

Из литературы известно [33, 34], что распределение частиц по размеру оказывает большое влияние на:

- способы обработки;
- угол естественного откоса;
- выбросы твёрдых частиц;
- доступ воздуха к поверхности анода (применительно к обожжённым анодам): газопроницаемость, насыпную плотность;
- фильтрацию электролита через корку и свойства формирования корки;
- теплопроводность.

Таблица 4 – Свойства укрывных материалов анода

	Свойство	Ед. изм.	Значение
Первичный укрывной материал (смешанный материал)	Объемная плотность	г/см ³	1,62–1,80
	Объемная плотность при уплотнении	г/см ³	1,88–2,11
	Проницаемость (свободное состояние)	nPm	3,3–4,3
	Угол естественного откоса	градусы	37–42
	Прочность на раздавливание (спеченный при 800 °С)	Н/мм ²	1,3–1,9
	Теплопроводность (100 °С)	Вт/м·К	0,21
Вторичный укрывной материал (спеченный материал)	Насыпная плотность	г/см ³	2,54–2,56
	Проницаемость (уплотненная часть)	nPm	0,02
	Прочность на раздавливание	Н/мм ²	0,3–0,77
	Теплопроводность (100 °С)	Вт/м·К	0,86–1,06

Важным показателем качества материала покрытия может быть его газопроницаемость [35]. Индекс газопроницаемости отражает способность укрытия защищать угольные аноды от окисления воздухом. В таблице 5 приведена информация об этом показателе для нескольких смесей материала покрытия. Из таблицы видно, что проницаемость свежего глинозема в несколько раз выше газопроницаемости вторичного. [33, 36].

Мучнистый глинозем имеет более низкую газопроницаемость (таблица 5) из-за высокого содержания фракции –45 мкм и пластинчатых частиц [37]. С другой стороны, глинозем песочного типа обычно состоит из крупных частиц круглой формы, так что воздух (кислород) задерживается внутри него, предотвращая проникновение и увлажнение электролита.

Как и в случае других свойств, показанных в таблице 4, значение угла естественного откоса и режим спекания имеют особый эффект. Угол наклона определяет устойчивость щитка: чем больше угол наклона, тем лучше материал

покрытия на анодном массиве.

Таблица 5 – Газопроницаемость укрывного материала анодного массива

Материал	Газопроницаемость, nPm
Глинозем свежий	89,0
Глинозем возвратный (фторированный после газоочистки)	15,0
Типичный укрывной материал	4,0
Смесь: 50 % материал (80 % < 90 мкм, 10 % > 250 мкм) 50 % глинозем	0,4
Смесь: 50 % материал (60 % < 90 мкм, 15 % > 250 мкм) 50 % глинозем	1,5

Также на угол наклона в определенной степени влияет содержание в засыпке частиц глинозема класса <45 мкм, а также количество воздуха, адсорбированного и механически удерживаемого между частицами в свежеприготовленном первичном материале. Если содержание класса <45 мкм превышает 20%, дугообразная структура анодного массива нестабильна и быстро разрушается. Крутой угол естественного откоса особенно желателен для покрытия периферийных краев анодов.

Текучесть глинозема [38] в основном определяется гранулометрическим составом материала, а также содержанием α -Al₂O₃. Материалом с хорошей текучестью можно считать глинозем с низкой степенью прокаливания. Он имеет размер зерна более 45 микрон, высокую степень однородности распределения частиц по размерам и угол естественного наклона от 30 до 40 °.

По мнению авторов исследования [39, 40] оптимальное распределение частиц по размерам первичного покрывающего материала было найдено, но оно не является стабильным по всей длине электролизера. Можно предположить, что высокое содержание мелких фракций с низким процентом содержания средних и крупных частиц не является решающим фактором. Другие исследователи [41] установили взаимосвязь между процентным содержанием в приготовленном электролите (вторичный укрывной материал и материал очистки «луз») тонких

фракций <45 мкм с нестабильной работой электролизёра. Отмечается, что если содержание этих фракций <45 мкм превышает 20 %, то повышается вероятность обвала избыточного укрывного материала анода, как по периферийной стороне, так и между анодов (рисунок 12).

Большие провалы корки приводят к образованию осадка на подине электролизера, что препятствует контролю содержания глинозема в электролите и приводит к нестабильной работе электролизера.



Рисунок 12 – Нарушение целостности укрытия анодного массива, приводящее к дестабилизации работы электролизной ванны

Было проведено исследование образования корки с использованием глинозема из трех различных распределений частиц по размерам: 43 мкм , $62 \div 74 \text{ мкм}$ и $89 \div 105 \text{ мкм}$ на поверхности электролита [42]. Образцы прокаливали при различных температурах в следующих условиях: 20 г оксида алюминия добавляли в тигель, содержащий 10 г расплавленного электролита. Отмечено, что содержание наименьшей фракции привело к образованию мягкой, но большой по высоте корки, в то время как содержание α -фазы не влияло на ее механическую прочность. В этой работе использовалось очень специфическое оборудование со сложной экспериментальной установкой, что затрудняло сравнение данных с результатами, полученными в других работах.

Работа показала [43] что на свойства материалов покрытия влияют свойства первичного глинозема. Однако определяющим фактором является серьезное изменение технологических параметров электролизера (температуры и состава электролита и т. д.), при которых электролит начинает проникать через слой оксида алюминия. В то же время свежий электролит, криолитно-алюминиевая корка и обратный электролит используются в следующих пропорциях в качестве защитных компонентов, которые обеспечивают прочность и удовлетворительную теплопроводность в следующих пропорциях: глинозем - 30%, криолитсодержащие компоненты материала покрытия - 70%. Распределение частиц по размеру криолитсодержащих компонентов материала покрытия, рекомендуемых в данной работе: 3–8 мм - 70%, менее 3 мм - 30%. Такое укрытие имеет объемную плотность 1,5 г / см³ и угол естественного откоса 34-36 °.

2.1.3 Технологии подбора состава укрывного материала

Согласно полученным данным, во всем мире для компенсации тепловых потерь в окружающую среду через верхнюю часть электролизера необходимо увеличить напряжение электролиза на 1,0-1,2 В. Уменьшение этих потерь способствует снижению напряжений и повышению энергоэффективности электролизера

Авторами [44] методами компьютерного моделирования проведено сравнение тепловых потерь и температуры анодов при варьировании высоты слоя утепляющего материала. В качестве сравнения была выбрана высота слоя засыпки 10 и 18 см. Потери тепла электролизерами, работающими с тонким слоем укрывного материала и электролизерами с большой высотой укрытия анода представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Диссипация тепла электролизерами при высоте слоя утепляющего материала – 10 см

Участок диссипации тепла		Диссипация тепла		
		кВт	В	%
Укрытие электролизера	Боковые стороны	112,8	0,346	18,4
	Фланцевый лист	15,5	0,047	2,5
	Торцевые стороны	15,0	0,046	2,4
Подытог		143,2	0,439	23,4
Анодная поверхность электролизёра	Поверхность корки	43,4	0,133	7,1
	Анододержатель	7,4	0,023	1,2
	Газы	181,5	0,557	29,7
Подытог		232,3	0,713	38,0
ИТОГО:		375,5	1,152	61,4

Таблица 6 – Диссипация тепла электролизерами при высоте слоя утепляющего материала – 18 см

Участок диссипации тепла		Диссипация тепла		
		кВт	В	%
Укрытие электролизера	Боковые стороны	97,1	0,298	16,1
	Фланцевый лист	21,0	0,064	3,5
	Торцевые стороны	16,3	0,050	2,7
Под итог		134,4	0,412	22,2
Анодная поверхность электролизёра	Поверхность корки	67,1	0,206	11,1
	Анододержатель	6,9	0,021	1,1
	Газы	111,5	0,342	18,5
Под итог		185,5	0,569	30,7
ИТОГО:		319,8	0,991	52,9

Тепловой баланс электролизера регулируется содержанием глинозема в расплаве, а также толщиной укрывного материала. Для высокоамперных

крупномасштабных электролизеров толщина укрытия в середине и торцах ванны должна быть различной.

Образцы укрывного материала с содержанием чистого фторированного глинозема и дробленой корки размерами частиц 0,5–8 мм показаны на рисунке 13 а и б, соответственно.

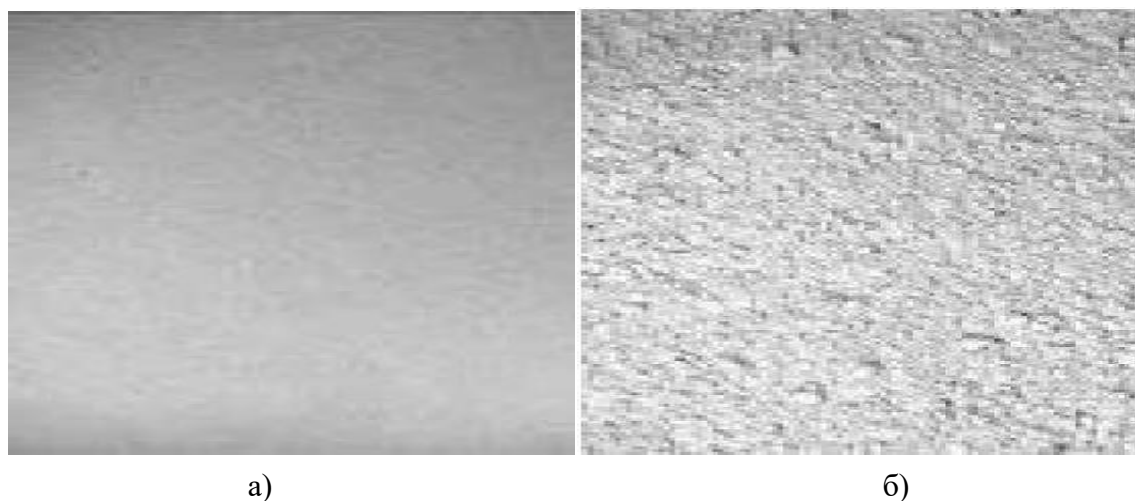


Рисунок 13 – Укрывной материал а) – из фторированного глинозема;

б) – из дробленой корки с размерами частиц 0,5–8 мм

Результаты моделирования потерь теплоты через верх анода электролизера на 350 кА, защищенного укрывным материалом, содержащем 50 % дробленой корки и 50 % глинозема толщиной 10 и 18 см представлены на рисунках 14 и 15.

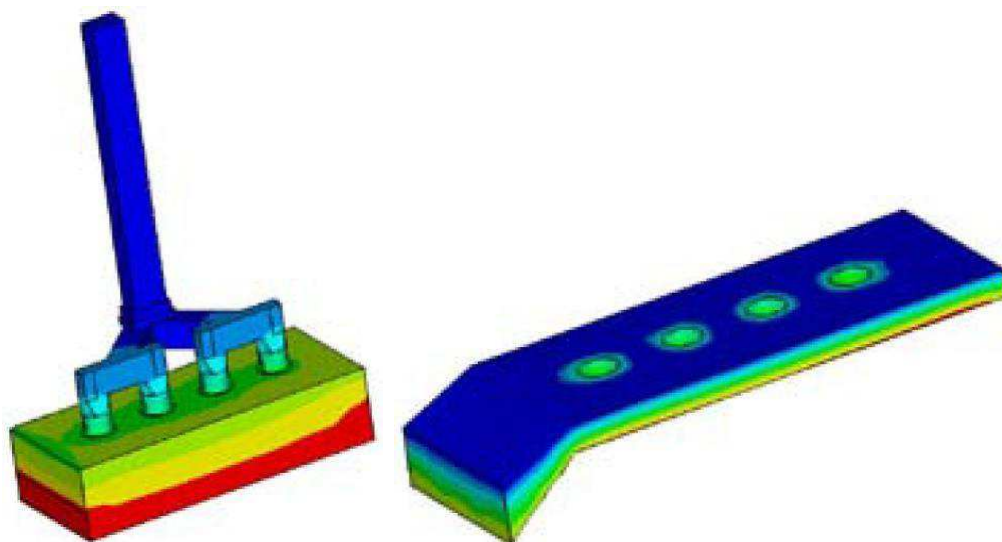


Рисунок 14 – Температура анода и анодного укрытия толщиной 10 см

При такой рецептуре укрывного материала и его толщине 10 см напряжение составляет 1,046 В, при 18 см – 0,883 В. Это показывает, что с помощью подбора состава и толщины укрывного материала напряжение процесса электролиза может быть снижено на 20 мВ.

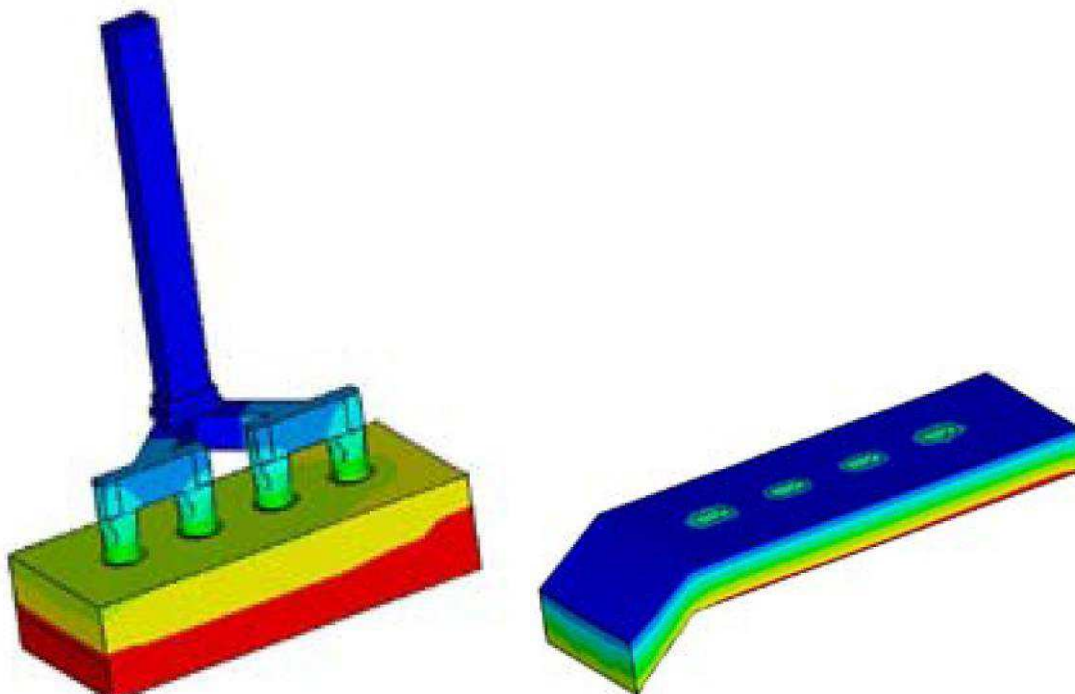


Рисунок 15 – Температура анода и анодного укрытия толщиной 18 см

Другой способ увеличения энергетической эффективности электролизера, предложенный авторами [44] – оборудование внутренних поверхностей

укрывных крышек теплоизоляционными композиционными материалами. За счет этого температура наружной поверхности укрытия снижается более чем на 10°C , что делает возможным снизить напряжение процесса электролиза на 5–15 мВ.

На заводе Nordural (Исландия) проводились измерения теплового потока через укрывной материал в 2 этапа, в 2007 и 2008 г [45]. Среднее значение теплового потока через укрытие 4–5 кВт/м². Температура поверхности укрытия в интервале 200–310 °С. Измерительный зонд размещался на поверхности укрытия между анодами. Общая толщина корки 6–12 см (стандарт – 12 см). Плотность корки 2,3–2,5 г/см³. Расчетное значение теплопроводности укрытия – 0,85 Вт/м·К. Фактическое значение теплопроводности (по результатам инструментальных измерений) представлено в таблице 7.

Согласно данным, представленным в таблице 7, фактическая средняя теплопроводность укрытия несколько выше расчетного значения и составляет $1,1 \pm 0,2$ Вт/м·К, что коррелируется с данными, полученными Ричардсом [46] (1,4 Вт/м·К при такой же плотности укрытия).

Таблица 7 – Результаты измерений теплопроводности укрывного материала

Толщина корки, см	Свободная толщина укрытия, см	Общая толщина укрытия, см	Тепловой поток, кВт/м ²	Температура поверхности, °С	Теплопроводность, Вт/м·К
5	1	6	9,6	290	0,9
4	1,5	5,5	11,5	312	1,0
5,5	2,5	8	9,4	271	1,3
8	7,5	15,5	5,2	206	1,4
6	6	12	5,8	250	1,2

2.2 Теплоизоляция электролизеров в верхней части футеровки

В работе [47] приведены исследования тепловых характеристик нескольких групп электролизеров, отличающихся конструкцией цокольной

футеровки и теплоизоляции. Отличие проявлялось в конструкции верхней части футеровки:

- первая группа электролизеров (типовая футеровка) – использовалась глиноземная подушка и слой плотного шамота;
- вторая группа – электролизеры с футеровкой из слоя сухих барьерных смесей (СБС).

Анализ теплового состояния катодных узлов электролизеров осуществлялись с использованием вмонтированных в цоколь термопар. Расположение термопар позволяло определять температуру центральных и периферийных частей цоколя на нескольких уровнях.

Было проведено множество экспериментальных тестов для сбора информации и было выявлено, что температурные характеристики нижней части наружных поверхностей катодных узлов электролизеров 1 и 2 отличались незначительно

Для сравнения на рисунках 16 и 17 показаны температурные распределения по поверхности днища, усредненные для 2 и 1 групп ванн, соответственно.

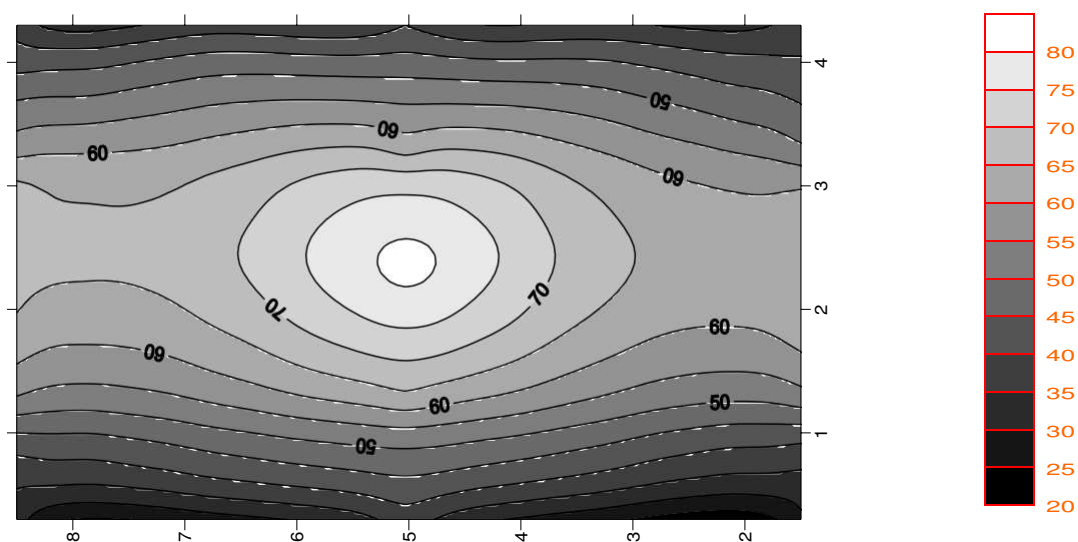


Рисунок 16 – Температурное поле днища электролизеров с футеровкой из слоя сухих барьерных смесей

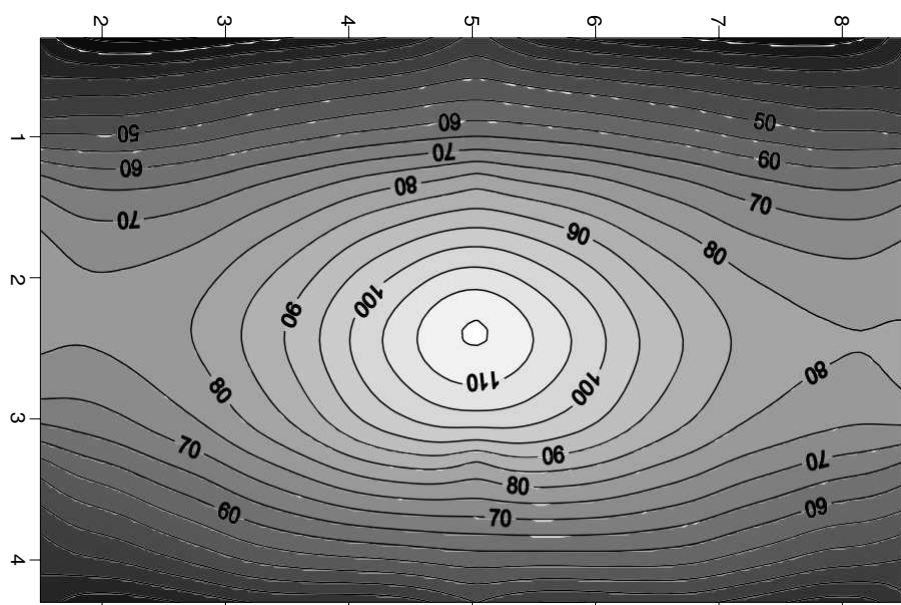


Рисунок 17 – Температурное поле днища электролизеров с глиноземной подушкой и слоем плотного шамота

В течение последующих 9 месяцев наблюдалось различное изменение тепловых характеристик цоколей 1 и 2 групп электролизеров: – для 1 группы электролизеров наблюдалось достаточно монотонное, но заметное повышение температуры днища; – для 2 группы электролизеров избыточная температура днища 6 месяцев почти не менялась, затем начала увеличиваться, но темп повышения температуры был значительно ниже, чем для электролизеров 1 группы.

Заметное отличие температур соответствует средней части катодного узла и определяется в основном формой и длиной настелей, которые в процессе обследования ванн имели нестабильный характер.

Для электролизеров 1 группы (типовая футеровка) и 2 группы (футеровка с использованием СБС) не были обнаружены протечи в цоколь и температуры днища обеих групп ванн после пуска практически совпадали. За последующие 8 месяцев избыточная температура днища 1 группы ванн увеличилась почти на 40 С. За этот же период времени температура днища ванн 2 группы возросла менее чем на 10 С. Приведено сопоставление опытных и расчетных значений температур (таблица 8).

Таблица 8 – Опытные и расчетные значения температур (°С) днища ванн

№	Параметр	Расчет	Экспе- римент	Расчет	Экспе- римент
		2 группа		1 группа	
1	Температура процесса	954	953...956	953	953
2	Температура борта (верх)	282	217...260	273	225...283
3	Температура борта (середина)	220	161...220	215	194...219
4	Температура борта (низ)	47	45...78	58	45...63
5	Температура днища	90	75...91	95	100...130
6	Температура силиката кальция	604	597	-	-
7	Температура пенидиатоми- (низ)	-	-	580	-
8	Температура пенидиатоми- (верх)	-	-	710	-
9	Температура пенидиатоми- (верх)	816	805	870	-
10	Температура шамота	895	903	920	-

Для 1 группы ванн характерна полная пропитка футеровки (под проекцией анода) и частичная – верхнего слоя пенидиатоми-та. Это подтверждается и большей неравномерностью температуры по днищу ванн-свидетелей.

Измерения и расчеты температур в цоколе 2 группы ванн показали, что футеровка электролизеров с СБС почти не изменила свойств. Основное изменение произошло в самом слое СБС, теплопроводность которого возросла в несколько раз.

Анализ тепловых характеристик катодных узлов 1 и 2 групп электролизеров показывает, что тепловые потери с катодных кожухов 2 группы электролизеров меньше, чем для первой на 8 кВт.

Были сделаны выводы, что при использовании СБС ожидается стабильное снижение тепловых потерь в окружающую среду относительно потерь для типовых футеровок на 6...10 кВт, которые необходимо компенсировать

снижением уставочного напряжения на 40...60 мВ. Это позволит снизить удельный расход электроэнергии на 150...200 кВт ч/т Al.

2.3 Регулирование тепловых потерь с поверхности катода

Во время работы алюминиевого электролизера тепловое сопротивление днища изменяется по мере того, как увеличивается теплопроводность изоляционных материалов футеровки вследствие их пропитки криолит-глиноземным расплавом. Согласно практическим данным, потери тепла через корпус катода увеличиваются на 27% при увеличении срока службы с 6 до 42 месяцев, объема осаждения в два раза и температуры электролита на 2,9 ° С. Тепловой режим электролизера можно увеличить, за счет нанесения покрытия на наружные поверхности кожуха электролизера.

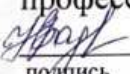
Покрытие наружных поверхностей конструкции электролизера не требует структурных изменений и значительных капитальных затрат. Путем нанесения теплоизоляционного адгезивного покрытия различной черноты и толщины на детали или все компоненты алюминиевой ванны осуществляется эксплуатационное, дифференцированное регулирование теплового режима электролизера. Это достигается за счет того, что покрытие легко наносится и удаляется, а также легко изменяется степень чернения покрытия и его толщина.

Техническое решение, предложенное [48], заключается в следующем. На определенные участки наружной поверхности конструкций электролизера (катод) наносят адгезионное покрытие с различной степенью черноты.

Преимуществами предлагаемого решения являются простота нанесения и удаления покрытия; оперативное и дифференцированное регулирование теплового режима электролизера; отсутствие больших капитальных затрат и необходимость конструктивных изменений для регулирования теплопередачи.

[Изъято 33 страницы]

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

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель магистерской
программы д-р хим. наук,
профессор

подпись инициалы, фамилия
« 07 » 07 2020 г.

Магистерская диссертация

22.04.02.02 «Металлургия цветных металлов»
код и наименование магистерской программы

Использование альтернативных материалов для устранения анодных эффек-
тов на электролизерах Содерберга
тема

Научный Руководитель


подпись, дата должность, уч. степень

подпись, дата

А.И.Рюмин
инициалы, фамилия
Р.Р. Богданов
инициалы, фамилия


Выпускник

Рецензент


подпись, дата директор по экол. ОТ и пром. безоп.
должность, место работы

А.А. Гавриленко
инициалы, фамилия

Консультант экономического
раздела


подпись, дата к.э.н., доцент
должность, уч. степень Т.В. Твердохлебова
инициалы, фамилия

Красноярск 2020