

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
институт  
«Электротехнология и электротехника»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.Н. Тимофеев  
подпись инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02.11– Электроэнергетика и электротехника  
код – наименование направления

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НАГРЕВА  
КАТОДНЫХ БЛОКОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ**  
тема

Руководитель

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

К.Т.Н. доцент  
должность, ученая степень

Д.А. Михайлов  
инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Т.С. Шаврин  
инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа БР по теме «Электротехнологический комплекс для нагрева катодных блоков алюминиевых электролизеров»

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

подпись, дата

М.В. Первухин  
инициалы, фамилия

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра «Электротехнологии и электротехники»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.Н. Тимофеев

подпись      инициалы, фамилия

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме бакалаврской работы**

Студенту Шаврину Тимофею Сергеевичу

Группа ФЭ 12-07Б Направление (специальность) 13.03.02

Электроэнергетика и электротехника

Тема выпускной квалификационной работы: «Электротехнологический комплекс для нагрева катодных блоков алюминиевых электролизеров».

Утверждена приказом по университету №5283/с от 19.04.2016

Руководитель БР Д.А. Михайлов, доцент, к.т.н., кафедра Электротехнологии и электротехники

Исходные данные для БР:

- 1 Установка электрического нагрева катодных секций: мощность 570 кВт;
- 2 Производительность: 24 катодных секций/смену (8 часов);
- 3 Температура катодных секций: 150–550°C;
- 4 Изделия: катодные секции электролизеров типа С8Б, С8БМ, ОА-300М2;
- 5 Равномерность распределения температуры по катодной секции: разброс не более 50°C;

Перечень разделов БР

- 1 Введение
- 2 Установка предварительного нагрева катодных секций электролизеров перед заливкой чугуном. Способы создания электрического контакта между блоком и блоком, их преимущества, недостатки и перспективные направления.
- 3 Численная параметрическая тепловая математическая модель установки электрического нагрева катодных секций.
- 4 Результаты оптимизационного поиска параметров и геометрических размеров установки с помощью численной математической модели.
- 5 Список используемой литературы

Перечень графического материала:

- 1 Общий вид установки;
- 2 Основные узлы установки:
  - а) система нагрева,
  - б) теплоизоляция.

Руководитель БР

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

подпись

\_\_\_\_\_

подпись

Д.А. Михайлов

инициалы, фамилия

Т.С. Шаврин

инициалы, фамилия

«01» октября 2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Катодные устройства электролизеров.....	6
1.1 Общие сведения об электролизерах.....	6
1.3 Катодное устройство.....	7
1.4. Система нагрева катодных секций компании Kanthal .....	8
1.5 Блюмс.....	9
1.5.1 Установка для нагрева блюмсов.....	9
1.6 Вывод .....	12
2 Тепловой расчет .....	14
2.1 Конструкторский расчет футеровки.....	14
2.2 Выбор изоляционных материалов.....	14
2.3 Определение размеров футеровки боковой стенки.....	14
2.3.1 Расчет футеровочного слоя.....	15
2.4 Определение мощности тепловых потерь через боковую стенку .....	17
2.5 Определение мощности тепловых потерь через свод .....	18
2.6 Общая мощность тепловых потерь .....	19
2.7 Цикл работы установки предварительного нагрева катодных секций... ..	19
2.8 Расчет теплового КПД установки .....	20
3 Математическая модель установки предварительного нагрева катодных секций .....	23
3.1 Постановка задачи и основные допущения .....	23
3.2 Математическая модель теплового поля .....	23
3.3 Система уравнений теплового поля .....	24
3.4 Результаты математического моделирования .....	27
4 Электрический расчет .....	28
4.1 Электрический расчет нагревателя .....	28
4.2 Исследование промышленного образца установки.....	29
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	31

## 1 Катодные устройства электролизеров

### 1.1 Общие сведения об электролизерах

Электролизёры, аппараты для электролиза, состоящие из одной или многих электролитических ячеек. Электролизёр представляет собой сосуд (систему сосудов), наполненный электролитом с размещёнными в нём электродами – катодом и анодом, соединёнными соответственно с отрицательным и положительным полюсами источника постоянного тока. В промышленности и лабораторной практике применяют электролизёры различных типов и конструкций (например, открытые и герметически закрытые, для периодической и непрерывной работы, с неподвижными и движущимися электродами, с различными системами разделения продуктов электролиза).

В зависимости от назначения электролизёры рассчитываются для работы при различных температурах – от минусовых (при электрохимическом синтезе малостойких кислородных соединений) до высоких плюсовых (при электролизе расплавленных электролитов в производстве алюминия, кальция). Соответственно, электролизёры снабжают устройствами для нагрева или охлаждения электролита или электродов.

По способу включения в электрическую цепь электролизёры разделяются на монои биполярные. Монополярный электролизёр состоит из одной электролитической ячейки с электродами одной полярности, каждый из которых может состоять из нескольких элементов, включённых параллельно в цепь тока. Биполярный электролизёр имеет большое число ячеек (до 100 – 160), включённых последовательно в цепь тока, причём каждый электрод, за исключением двух крайних, работает одной стороной как катод, а другой как анод.

Для изготовления анодов применяют графит, углеграфитовые материалы, платину, окислы некоторых металлов, свинец и его сплавы; используются малоизнашивающиеся титановые аноды с активным покрытием из смеси окислов рутения и титана, а также платины и её сплавов. Для катодов в большинстве электролизёров используется сталь. Применяются также электролизёры с жидкими электродами (например, в одном из методов производства хлора и гидроокиси натрия в качестве катода используют ртуть). Некоторые электролизёры работают под давлением, например, разложение воды ведётся под давлением до  $4\text{Мн/м}^2$  ( $40\text{ кгс/см}^2$ ); разрабатываются электролизёры для работы под более высоким давлением.

Материалы для изготовления электролизёров выбираются с учётом агрессивности электролита и продуктов электролиза, температуры и других условий. Широко применяется сталь, в том числе с различными защитными покрытиями, пластические массы, стекло и стеклопластики, керамика.

Современные крупные электролизёры имеют высокую нагрузку: монополярные до 400 – 500 кА, биполярные – эквивалентную 1600 кА.

### **1.3 Катодное устройство**

Современные катоды являются изделиями оптимальной конструкции, изготовленными из тщательно подобранных материалов с применением новейшей технологии и рассчитаны на срок службы более 5-ти лет. Однако срок службы катодного устройства в значительной степени зависит от способа обжига, метода пуска и качества эксплуатации электролизера.

Катодное устройство служит механической основой электролизера любой конструкции. Оно обеспечивает также условия, необходимые для протекания процесса электролиза в криолитоглиноземном расплаве.

Катодное устройство состоит из стального сварного кожуха, теплоизоляционного цоколя и углеродистой футеровки, образующей шахту электролизёра и представляет собой ванну, выложенную из углеграфитовых подовых блоков и бортовых угольных или карбидокремниевых плит. Вся конструкция заключена в металлический кожух. Между стенками кожуха и блоками размещается огнеупорная и теплоизоляционная футеровка.

В процессе электролиза происходит пропитка угольной и огнеупорной футеровок фтористыми солями, их разбухание и возникновение внутренних напряжений в конструкции катода.

С учётом этого, конструкции катодных кожухов подразделяется на два типа: катоды с рамным кожухом, не имеющим днища, и катоды с кожухом, имеющим металлическое днище, конструкция представлена на рисунке 1.

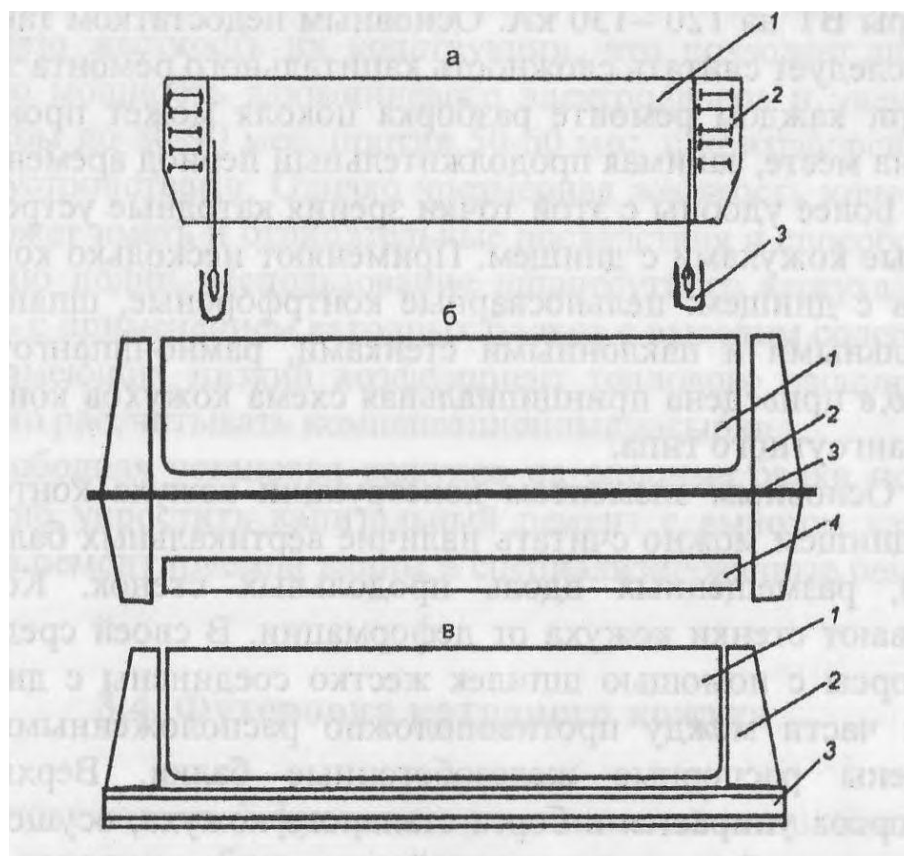


Рисунок 1 – Конструкция катодных кожухов: а – рамный кожух без дна: 1 – кожух; 2 – швеллерные балки; 3 – анкерное крепление; б – контрфорсный кожух с дном: 1 – кожух; 2 – контрфорсная балка; 3 – стягивающая шпилька; 4 – распорная балка; в – шпангоутный кожух с дном: 1 – кожух; 2 – шпангоутное устройство; 5 – распорная балка

Использование шпангоутного кожуха следует совмещать с применением катодных блоков с высоким содержанием графита, имеющих низкий коэффициент теплового расширения, а также точно рассчитывать компенсационные засыпки.

Свободная установка кожухов на опорные балки позволяет существенно упростить капитальный ремонт с вывозом катодного устройства ремонтируемой ванны в специализированные ремонтные цехи.

#### 1.4. Система нагрева катодных секций компании Kanthal

Системы электрического нагрева алюминия и стали, разработанные Kanthal, значительно сокращают потребление энергии по сравнению с нагревом газовым способом. Устройство системы электрического нагрева позволяет более точно направить теплоту к нужной области, этот способ является эффективным методом повышения температуры.

Используя электрическое нагревание, также сокращаются выбросы углекислого газа  $CO_2$  – то есть уменьшается вредное воздействие на окружающую среду в производстве первичного алюминия и производстве



стали:

Бывают такие системы электрического нагрева:

1.Предварительный нагрев катодных секций;

2.Предварительный нагрев анодных секций.

Предварительный нагрев катодных секций.

Нагревая заранее смонтированные стальные стержни и блоки катода, Kanthal демонстрирует идею, как избавиться от необходимости перемещать, снимать и/или помещать горячие стальные стержни. Этот способ разработан из-за того, что перемещение горячих стальных стержней является потенциально опасным процессом.

Разработанная станция предварительного нагрева катода компанией Kanthal действует таким образом: тепловая энергия действует непосредственно на сам стальной блюмс и обеспечивает косвенное нагревание в конкретном месте. С помощью данного метода происходит процесс энергосбережения, он достигается за счет того, что нет необходимости в нагреве всей массы блока графита. Значительно снижается риск несчастных случаев, так как не нужно поднимать и перемещать горячие и тяжелые блюмсы подъемными кранами и подъемными устройствами. Это позволяет более эффективно обрабатывать катодную секцию и более точно обрабатывать блюмс.

## **1.5 Блюмс**

### **1.5.1 Установка для нагрева блюмсов**

Установка для нагрева блюмсов. Рассмотрим данный патент RU 2142606.

Изобретение предназначено для монтажа и ремонта электролизеров для получения алюминия и позволяет снизить расход энергии на нагрев блюмсов, а также получить эффективную систему улавливания и эвакуации образующихся при нагреве вредных газов. Установка состоит из верхней съемной части, выполненной в виде герметичного кожуха с горелками и стационарной нижней части, включающей раму, на которой установлены катодные блоки с блюмсами и коробка, служащего для сбора и транспортировки газов сгорания. К одной из стенок короба подсоединен патрубок для отвода продуктов сгорания газа. Для герметичности на границе верхней и нижней частей установки, а также на границе нижней части и фундамента имеются песочные затворы. Горелки имеют устройства для автоматического электрозажигания и для контроля процесса горения.

При монтаже катодной секции алюминиевого электролизера стальной блюмс помещают в паз катодного блока и заливают жидким чугуном паз вокруг блюмса. Перед заливкой чугуна в паз блюмс нагревают до температуры 500 – 700°C для исключения растрескивания стенок паза. Для

нагрева используют установки различной конструкции с электрическим и газовым нагревом.

Известно устройство для нагрева блюмсов, выполненное в виде печи с расплавленным металлом, в который погружают блюмс и нагревают его до нужной температуры и затем укладывают в паз катодного блока. (Патент РФ N 2038424). Недостатком такого устройства является то, что в процессе перемещения, а также при нахождении в расплавленном металле блюмс деформируется, что делает его непригодным для использования в качестве элемента подовой секции.

Известна установка для нагрева блюмсов, заформованных в катодные блоки перед заливкой их чугуном (патент Франции 2175657). Она состоит из опоры для катодных блоков и газовых горелок. Недостатком установки является ее большая энергоемкость.

Технической задачей изобретения является снижение расходов энергии на нагрев блюмсов, эффективная система улавливания и эвакуации образующихся при нагреве вредных газов.

Ниже на рисунках 2 и 3 приведен пример выполнения установки для нагрева блюмсов катодных секций алюминиевых электролизеров.

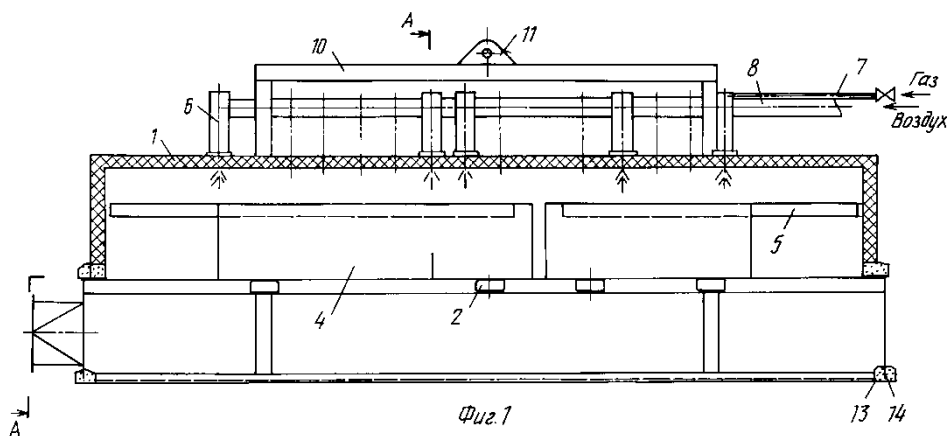


Рисунок 2 – Продольный разрез установки

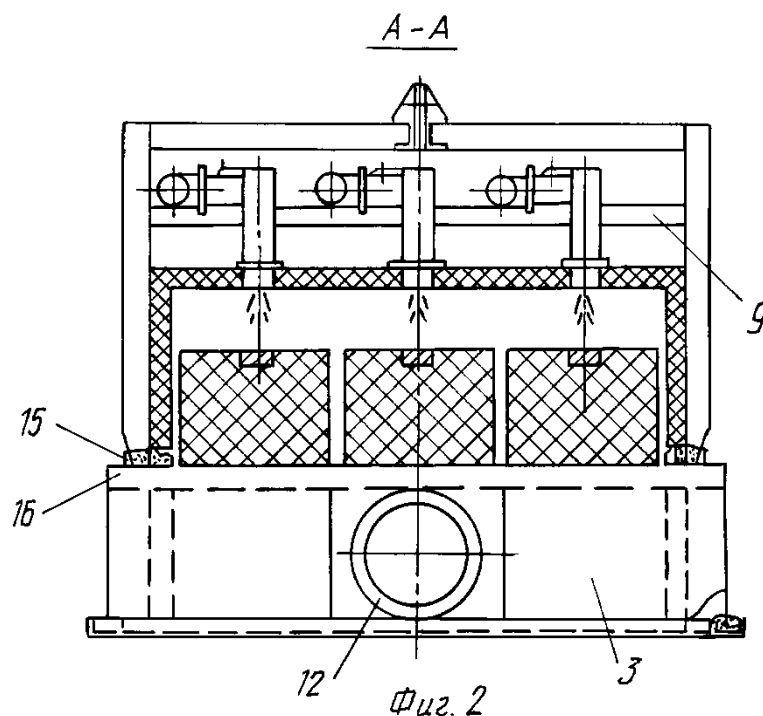


Рисунок 3 – Поперечный разрез установки

Установка для нагрева блюмсов катодных блоков алюминиевых электролизеров состоит из футерованного изнутри кожуха 1, который установлен на раму 2, имеющую по периметру стенки с теплоизоляцией, образующие короб 3. Рама 2 предназначена для размещения на ней катодных блоков 4 с блюмсами 5. В верхней части кожуха 1 установлены горелки 6, к которым по трубам 7 подводят газ и по трубам 8 подводят воздух. Трубы уложены на опорах 9, размещенные на кожухе 1. Для транспортировки кожуха 1 служит траверса 10 с проушинами 11, жестко связанная с кожухом. На одной из стенок короба 3 имеется газоотводящий патрубок 12, подсоединенный к дымососу или другому патрубку, отводящему отработанные газы (на чертежах не показан).

Для герметизации установки между фундаментом и стенками короба 3 имеется песочный затвор, представляющий из себя желоб 13, проходящий внизу короба по его периметру и заполненный сыпучим материалом 14. Нижние кромки боковых стенок короба 3 опущены в желоб 13 с сыпучим материалом 14, создавая герметизацию по всему периметру установки. Такой же песочный затвор имеется на стыке кожуха 1 с рамой 2, образованный желобом 15 с сыпучим материалом 16.

Описанная установка рассчитана на одновременный нагрев шести блюмсов, установленных в катодных блоках. Горелки 6 в кожухе 1 равномерно размещены по длине катодных блоков.

Установка работает следующим образом.

При снятом кожухе 1 на раму 2 помещают 6 катодных блоков 4, парами в три ряда, таким образом, чтобы пазы для блюмсов располагались вверху катодного блока, а выступающие части блюмсов каждой пары были

направлены в противоположные стороны. Затем закладывают в пазы блюмсы 5. После этого на раму 2 устанавливают кожух 1, пользуясь траверсой 10 с проушинами 11, подсоединяют гибкими шлангами к трубам 7 и 8 газ и воздух. Розжиг горелок осуществляют автоматически с помощью свечей электрозажигания, размещенных в самих горелках.

Пламя горелок 6, расположенных над блюмсами 5, нагревает их, а продукты сгорания газа через раму 2 проходят вниз в короб 3 и при этом омывают поверхности катодных блоков, нагревая их. Контроль за температурой нагрева блюмсов производят термометрами, установленными на кожухе 1 (на чертежах не показано). Отвод сгоревшего газа производят с помощью естественной тяги или дымососом через патрубок 12.

После нагрева блюмсов до необходимой температуры подачу газа к горелкам 6 прекращают, кожух 1 снимают с рамы 2 и начинают заливку блюмсов чугуном. В качестве сыпучего материала в песочном затворе используют глинозем. Электропитание к горелкам кожуха 1 подводят гибким кабелем (на чертеже не показано).

Данное изобретение относится к улучшению углеродистых блоков, имеющие металлические блюмсы, работают в качестве нижней части тигля в электролитическом производстве алюминия.

Подтигляпромышленных ванн, используется для электролитического получения алюминия, как правило, оно формируется из предварительно запеченного антрацита или графита углеродистых блоков или блоков других коксующих материалов. Каждый углеродистый блок, который используется в качестве катодного тока питания для электролиза, оснащен металлическим, питающим блюмсом, находящимся в удлиненном пазе, сформированный, чтобы блюмс располагался по всей длине блока.

Чтобы установить блюмс в углубление, достаточное, чтобы обеспечить электрический контакт между блюмсом и блоком, существует два метода.

1: углеродистая паста набивается в промежутки между блоком и блюмсом.

2: расплавленный металл вливают в промежутки, чтобы заполнить место между блоком и блюмсом.

Второй метод может быть адаптирован для массового производства при минимальных вложениях, но он имеет недостаток: из-за того, что углеродистые блоки подвергаются сильному тепловому удару так часто, это вызывает появление поперечных трещин, которые неблагоприятно влияют на внешние грани торцов блока. Такие трещины обычно не появляются в блоках короткой длины, но с увеличением длины блока такие трещины появляются всё чаще.

## **1.6 Вывод**

На основе вышеперечисленной информации в процессе работы необходимо решить проблему неравномерности нагрева установки

электрического нагрева катодных секций. Данная проблема происходит из-за высокой теплоотдачи по бокам катодных блоков, в то время как в центре блока тепло сохраняется дольше.

[изъято 2 страницы]

## 2 Тепловой расчет

### 2.1 Конструкторский расчет футеровки

При конструировании установки предварительного нагрева катодных секций необходимо осуществить выбор материалов и геометрических размеров футеровочных слоев ограждений, а затем рассчитать тепловые потери через боковые стены.

Проведём расчёт футерованной части установки.

### 2.2 Выбор изоляционных материалов

Футеровка установки предварительного нагрева катодных секций является одним из основных и ответственных элементов, от которого зависят технико-экономические показатели, производительность и надёжность работы. Футеровка должна иметь высокую стойкость и длительный срок службы, так как стоимость футеровочных материалов высока.

В качестве футеровки используются теплоизоляционные блоки (модули) из керамического волокна марок ТБКВ. Такие теплоизоляционные блоки стойки к кислотам (кроме плавиковой и ортофосфорной), щелочам, маслам, углеводородам и воде. Футеровочный слой в данной конструкции установки применяется один.

Первоначально, перед тем как рассчитать геометрические размеры футеровочного слоя, необходимо определить площадь соответствующих поверхностей.

### 2.3 Определение размеров футеровки боковой стенки

Принимаем рабочую температуру в установке предварительного нагрева катодных секций  $t_{p.в.}$  равной  $720^{\circ}\text{C}$ , температуру окружающего воздуха  $t_{окр}$  равной  $25^{\circ}\text{C}$ , наружной поверхности катодных блоков  $t_{нар}=55^{\circ}\text{C}$ . Во всех вычислениях погрешность  $\epsilon$  не должна превышать значения 0,02.

Принимаем количество слоев футеровки  $n$  равным одному. Данные материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры футеровки

Материал	Плотность $\rho_i$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость $c_i$ , Дж/(кг·°К)	Максимальная рабочая температура $t_{раб}^{max}$ , °С	Удельная теплопроводность $\lambda'$ , Вт/(м·°К)
ТБКВ	200	1100	1260	0,22

Далее необходимо найти коэффициент теплоотдачи от наружных поверхностей к окружающему воздуху  $a_2$  по формуле:

$$a_2 = a_0 + a_1 + (t_{нар} - 30) - a_2(t_{нар} - 30)^2 + a_3(t_{нар} - 30)^3 \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – постоянные коэффициенты, зависящие от вида теплоотдающей поверхности, представлены в таблице 2.

$t_{нар}$  – температура наружной поверхности, °С;

$$t_{нар} = 55^\circ\text{С}.$$

Таблица 2 – Значения коэффициентов теплоотдачи ограждающих поверхностей

Вид теплоотдающей поверхности	Коэффициенты			
	$a_0$	$a_1 \cdot 10^{-3}$	$a_2 \cdot 10^{-4}$	$a_3 \cdot 10^{-6}$
Боковая вертикальная стенка	9,5	98,15	4,74	1,74

Находим  $a_2$ :

$$a_2 = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} + (55 - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} \cdot (55 - 30)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot (55 - 30)^3 = 34,329 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Так как катодный блок отдает тепло стенке, то принимаем коэффициент теплоотдачи к внутренним поверхностям  $a_1$ , равным  $50 \text{ Вт/м}^2$ .

Плотность теплового потока  $q$  находим по формуле:

$$q = a_2 \cdot (t_{нар} - t_{окр}), \quad (2)$$

Находим  $q$ :

$$q = 34,329 \cdot (55 - 25) = 1029,87 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким образом, был оценен расход тепла через ограждающие конструкции, а именно, через боковые вертикальные стенки. Расход составляет  $1029,87 \text{ Вт/м}^2$ .

### 2.3.1 Расчет футеровочного слоя

Толщина футеровочного слоя  $b_1$  по формуле:

$$b_1 = (0,1 \div 0,5) \cdot h_{cm}, \quad (3)$$

где  $h_{cm}$  – высота стенки, м;

Высота стенки футеровочного слоя, равна высоте установки предварительного нагрева катодных секций и составляет 1,41 м.

Находим  $b_1$ :

$$b_1 = 0,1 \cdot 1,41 = 0,141 \text{ м.}$$

Принимаем  $b_1 = 0,141 \text{ м}$ .

Температура внутренней поверхности стенки  $t_{\text{вн}}$  находим по формуле:

$$t_{\text{вн}} = t_{\text{р.в.}} - \frac{q}{a_1 \cdot F_{\text{см}}}, \quad (4)$$

Площадь стенки находим по формуле:

$$F_{\text{ст}} = L_{\text{внешн}} \cdot H_{\text{внешн}}, \quad (5)$$

Получим:

$$F_{\text{ст}} = 1,17 \cdot 3,9 = 4,563.$$

Находим  $t_{\text{вн}}$ :

$$t_{\text{вн}} = 720 - \frac{1029,87}{50 \cdot 4,563} = 715^\circ\text{C}.$$

Суммарное термическое сопротивление теплопроводности ограждения  $\sum R$  по формуле:

$$\sum R = \frac{|t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}|}{q}, \quad (6)$$

Находим  $\sum R$ :

$$\sum R = \frac{[715 - 55]}{1029,87} = 0,641 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности первого слоя  $R'_1$  по формуле:

$$R'_1 = \frac{b_1}{I'_1}, \quad (7)$$



где  $I'_1$  - удельная теплопроводность первого слоя, материал ТБКВ (см. таблица 1), Вт/(м·°К);

Находим  $R'_1$ :

$$R'_1 = \frac{0,141}{0,22} = 0,641 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Термическое сопротивление, необходимое компенсировать  $R_{11}$  по формуле:

$$R_{11} = \sum R - R'_1, \quad (8)$$

Находим  $R_{11}$ ,:

$$R_{11} = 0,641 - 0,641 = 0 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Делаем вывод: термическое сопротивление компенсировано.

## 2.4 Определение мощности тепловых потерь через боковую стенку

Найдём мощность тепловых потерь через боковую стенку установки нагрева катодных секций по формуле  $q_{ст}$ :

$$q_{ст} = \frac{(t_{вн} - t_{нар})}{\frac{1}{a_3 \cdot F_{вн}} + \frac{b_1}{F_1 \cdot l_1} + \frac{1}{a_4 \cdot F_{внешн}}}, \quad (9)$$

где  $a_3, a_4$  – коэффициенты теплоотдачи от внутripечного пространства к внутренней стенке и от внешней стенки к воздуху, Вт/м·°С;

$b_1$  – толщина слоя футеровки, м.

$F_{вн}$  – площадь внутренней стенки;

$F_{внешн}$  – площадь внешней стенки;

$F_1$  – усредненная площадь  $F_{вн}$  и  $F_{внешн}$ ;

$t_{вн}$  – температура внутри печи;

$t_{нар}$  – температура наружная.

Площадь боковых стенок находим  $F_{вн}$ ,  $F_{внешн}$  по формуле:

$$F_{вн} = L_{вн} \cdot H_{вн}, \quad (10)$$

$$F_{внешн} = L_{внешн} \cdot H_{внешн}. \quad (11)$$

Подставив значения, получаем:

$$F_{вн} = 1,42 \cdot 4,3 = 6,106 \text{ м}^2,$$

$$F_{внешн} = 1,17 \cdot 3,9 = 4,563 \text{ м}^2.$$

где  $L_{вн}$  – длина внутренней стенки;

$H_{вн}$  – высота внутренней стенки;

$L_{внешн}$  – длина внешней стенки;

$H_{внешн}$  – высота внешней стенки;

Найдем усредненную площадь  $F_{вн}$  и  $F_{внешн}$  по формуле:

$$F_1 = \frac{F_{вн} + F_{внешн}}{2}, \quad (12)$$

Получим:

$$F_1 = 5,335 \text{ м}^2.$$

Таким образом  $q_{см}$ :

$$q_{см} = \frac{(720 - 55)}{\frac{1}{50 \cdot 6,106} + \frac{0,2}{5,335 \cdot 0,22} + \frac{1}{12,1 \cdot 4,563}} = 3,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

## 2.5 Определение мощности тепловых потерь через свод

Найдём мощность тепловых потерь  $q_{свода}$  через свод установки нагрева катодных секций по формуле:

$$q_{свода} = \frac{(t_{вн} - t_{нар})}{\frac{1}{a_3 \cdot F_{вн.свода}} + \frac{b_1}{F_2 \cdot l_1} + \frac{1}{a_4 \cdot F_{внешн.свода}}}, \quad (13)$$

Площадь внутренней и наружной поверхностей свода находим по формуле:

$$F_{вн.свода} = L_{вн.свода} \cdot H_{вн.свода}, \quad (14)$$

$$F_{внешн.свода} = L_{внешн.свода} \cdot H_{внешн.свода} \quad (15)$$

Подставив значения, получаем:

$$F_{вн.свода} = 3,58 \cdot 3,9 = 13,962 \text{ м}^2,$$

$$F_{внешн.свода} = 3,98 \cdot 4,3 = 17,114 \text{ м}^2.$$

где  $L_{вн.свода}$  – длина внутренней поверхности свода;

$H_{\text{вн. свода}}$  – ширина внутренней поверхности свода;

$L_{\text{внешн. свода}}$  – длина внешней поверхности свода;

$H_{\text{внешн. свода}}$  – ширина внешней поверхности свода.

Найдем усредненную площадь  $F_{\text{вн. свода}}$  и  $F_{\text{внешн. свода}}$  по формуле:

$$F_2 = \frac{F_{\text{вн. свода}} + F_{\text{внешн. свода}}}{2}, \quad (16)$$

Получим:

$$F_2 = 15,538 \text{ м}^2.$$

Таким образом  $q_{\text{свода}}$ :

$$q_{\text{свода}} = \frac{(720 - 55)}{\frac{1}{50 \cdot 13,962} + \frac{0,2}{15,538 \cdot 0,22} + \frac{1}{12,1 \cdot 17,114}} = 1,02 \cdot 10^4 \text{ Вт.}$$

## 2.6 Общая мощность тепловых потерь

Общая мощность тепловых потерь равна потерям каждой из боковых стенок и потерям свода.

Рассчитаем общую мощность потерь через две стенки по бокам и через свод по формуле:

$$P = 2 \cdot q_{\text{ст}} + q_{\text{свода}}, \quad (17)$$

где  $q_{\text{ст}}$  – мощность тепловых потерь через стенку;

$q_{\text{свода}}$  – мощность тепловых потерь через свод.

Получим:

$$P = 2 \cdot 3,5 \cdot 10^3 + 1,02 \cdot 10^4 = 17200 \text{ Вт.}$$

## 2.7 Цикл работы установки предварительного нагрева катодных секций

Оператор с пульта даёт команду на привод тележек на перемещение внутрь тепловой камеры (одна за другой). После перемещения тележек внутрь в определенном месте срабатывают концевые выключатели и тележки останавливаются в определенном месте тепловой камеры.

Оператор находится около пульта, видит на пульте индикацию о готовности установки на включение. Выполняет включение нагрева поочередно требуемых секций на нагрев. Осуществляется нагрев блоков.

[изъята 1 страница]

## 2.8 Расчет теплового КПД установки

Для того, чтобы оценить эффективность установки необходимо сделать ряд расчетов исходя из заданных параметров в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры для расчета КПД

Параметр	Значение
$t_{\text{начала}}, \text{C}^\circ$	25
$t_{\text{оконч}}, \text{C}^\circ$	520
$t_{\text{нагрева}}, \text{c}$	4800
$P_{\text{системы}}, \text{кВт}$	144

Рассчитаем энергию, которая идёт на нагрев блока по формуле:

$$E = m \cdot c \cdot (t_{\text{оконч}} - t_{\text{начала}}), \quad (18)$$

где  $m$  – масса нагреваемого тела, кг;

$c$  – удельная теплоёмкость, Дж/кг·C°;

$t_{\text{оконч}}, t_{\text{начала}}$  – конечная и начальная температуры нагревасоответственно.

Предварительно необходимо рассчитать массу блока, материалом которого является графит, согласно формуле:

$$m = \rho \cdot V, \quad (19)$$

где  $\rho$  – плотность блока, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объем блока, м<sup>3</sup>.

Плотность графитового блока составляет  $\rho = 2250 \text{ кг/м}^3$ .

Найдем объем блока по формуле:

$$V = W \cdot H \cdot L, \quad (20)$$

где  $L$  – длина, м;

$W$  – ширина, м;

$H$  – высота, м.

Получим:

$$V = (W \cdot H \cdot L) - 2 \cdot (W_o \cdot H_o \cdot L_o) = 3,2 \cdot 0,72 \cdot 0,46 - 2 \cdot (0,103 \cdot 0,228 \cdot 3,2) = 0,91 \text{ м}^3.$$

где  $L_o$  – длина отверстий, м;  
 $W_o$  – ширина отверстий, м;  
 $H_o$  – высота отверстий, м.

$$m = 0,91 \cdot 2250 = 2047,5 \text{ кг.}$$

Рассчитаем мощность, которая идет на нагрев блока по формуле:

$$P_o = \frac{k \cdot E}{t_{\text{нагрева}}}, \quad (21)$$

где  $k$  – коэффициент учитывающий запас мощности;

$E$  – энергия, которая идет на нагрев блока, Дж;

$t_{\text{нагрева}}$  – время нагрева блока от температуры окружающей среды до температуры конечной, с.

Удельная теплоемкость блока составляет  $c_{\text{бл}} = 500 \text{ Дж/кг}\cdot\text{С}^\circ$

$$E = 2047,5 \cdot 500 \cdot (270 - 25) = 2,51 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

Получим:

$$P_n = \frac{1 \cdot 2,51 \cdot 10^8}{4800} = 52,2 \text{ кВт.}$$

Далее аналогично формулам 18 – 22 рассчитываем мощность, которая идет на нагрев блюмсов. В одной линии нагрева находится: 1 блок и 4 блюмса, они попарно одинаковой длины. Необходимо найти объем каждого из 2 различных блюмсов, далее их суммировать, рассчитать массу, энергию и мощность.

Плотность материала, из которого выполнен блюмс, металл СтЗкп,  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ . Удельная теплоемкость стали СтЗкп составляет  $c_{\text{бл}} = 800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{С}^\circ$ .

$$V_{\text{бл}} = 2 \cdot V_{\text{бл1}} + 2 \cdot V_{\text{бл2}} = 2 \cdot 2,42 \cdot 0,08 \cdot 0,22 + 2 \cdot 2,02 \cdot 0,08 \cdot 0,22 = 0,152 \text{ м}^3.$$

$$m_{\text{бл}} = 0,152 \cdot 7850 = 1193,2 \text{ кг.}$$

$$E_{\text{бл}} = 1193,2 \cdot 800 \cdot (330 - 25) = 2,91 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

$$P_{\text{бл}} = \frac{1 \cdot 2,91 \cdot 10^8}{4800} = 60,6 \text{ кВт.}$$

Далее необходимо рассчитать общую мощность блока и блюмсов. Для этого суммируем значения, и получаем:

$$P = 52,2 + 60,6 = 112,8 \text{ кВт.}$$

Следующий этап – расчет теплового КПД, производится на основании заданных параметров, приведенных в таблице 3:

$$\eta = \frac{P - P_{\text{системы}}}{P}, \quad (22)$$

где  $\eta$  – тепловой коэффициент полезного действия;  
 $P_{\text{системы}}$  – мощность системы нагрева одной линии.

$$\eta = \frac{112,8}{144} \cdot 100\% = 78\%,$$

Тепловые потери составляют:

$$144 - 112,8 = 31 \text{ кВт.}$$

В том числе через футеровку 17 кВт и через неплотности штор 14 кВт.

Согласно данным расчетам можно сделать выводы об эффективности установки. Часть затраченной на нагревание мощности идет на совершение полезной работы. Таким образом, считается целесообразным уменьшить тепловые потери при нагреве катодных блоков и блюмсов. В следующих пунктах будет рассказано, каким способом можно этого добиться.

### 3 Математическая модель установки предварительного нагрева катодных секций

#### 3.1 Постановка задачи и основные допущения

Для выравнивания температуры нагрева катодных блоков необходимо разработать математическую модель, которая позволяла бы произвести корректный расчет. Она подразумевает перераспределить тепловые потоки в камере за счет закрывающейся торцевой завесы, тем самым ускорится темп нагрева блюмса. Для этого была создана параметрическая трехмерная модель расчетной области установки предварительного нагрева катодных секций с приемлемой аппроксимацией конструкции устройства.

Разработка и создание установки с электрическим нагревом представляет качественно новый уровень и открывает возможность получения равномерно нагретого блока за счет электронагрева.

Поставленная задача решается на численной модели, расчетная область которой включает: электронагреватель, подвеска, блок, футеровка установки, тележка, рельсовый путь.

Для решения тепловой задач принимаются нижеприведенные допущения, которые позволяют минимизировать погрешности, связанные со сложностью учета геометрии реальной установки и температурной зависимостью ряда материалов.

Допущения тепловой задачи:

- 1) пренебрегается влиянием каркаса;
- 2) теплопроводность и теплоемкость блока, а также плотность, теплопроводность и теплоемкость воздуха и один слой футеровки изотропны;
- 3) температура окружающей среды постоянна и неизменна во времени;

#### 3.2 Математическая модель теплового поля

Приведенные на рисунке геометрические размеры определяют следующие параметры расчетной области:  $h_{en}$  – высота внутripечного пространства;  $W_g$  – ширина внутripечного пространства;  $L_g$  – длина внутripечного пространства;  $S_{cm1}$  – толщина  $l$ -го слоя стенки;  $l_{нэ}$  – длина нагревательного элемента.

Кроме данных геометрических параметров в расчетную область включается:  $N_{экр}$  – степень экранирования, в зависимости от прорези трубы, были рассмотрены варианты: с закрытой трубой; вариант с раскрытием прорези ( $22^\circ$ ); вариант с раскрытием прорези; Вариант без трубы ( $45^\circ$ ).  $N_{диафр}$  – степень диафрагмирования,  $N_{экр.бл}$  – степень экранирования блока.

[изъято 2 страницы]

Таблица 4– Параметры расчетной области тепловой задачи

Параметр	Значение			
$W_B$ , м	0,88			
$L_B$ , м	3,9			
$h_{вп}$ , м	1,17			
$S_{ст1}$ , м	0,2			
$l_{нэ}$ , м	4,37			
$N_{экр}$	1	0,61	0,125	0
$N_{диафр}$	0	1		
$N_{экр. бл}$	0	1		

### 3.3 Система уравнений теплового поля

Решение тепловой задачи сводится к нахождению температурного поля на концах катодного блока, так же позволяет найти средний температурный перепад в блоке, среднюю температуру контактной поверхности блюмса, среднюю температуру блюмса, максимальную температуру трубы, максимальную температуру нагревательного элемента. Также, благодаря тепловому расчету, была найдена энергия, аккумулированная футеровкой боковой стенки, рассчитаны тепловые потери.

Ввиду того, что решаемая тепловая задача относится к сопряженным задачам теплообмена, учет теплообмена излучением и теплопроводностью от электронагревателя осуществляется системой уравнений переноса тепла (26), (27), дополненных совокупностью граничных условий.

Система уравнений переноса тепла включает уравнение неразрывности (26) и дифференциальное уравнение Фурье – Кирхгофа для тел с внутренними источниками теплоты (27):

$$r \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + r \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} + r \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} = 0, \quad (26)$$

$$c \cdot r \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{V}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{V}_y \frac{\partial T}{\partial y} + \bar{V}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = I \cdot \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + P, \quad (27)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость катодного блока, Дж/(кг·°C);

$T$  – температура, °C;

$P$  – удельная объемная мощность тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>.

Удельный тепловой поток от электронагревателя на поверхность катодного блока определяется с помощью уравнения Стефана – Больцмана :

$$q = e \cdot c_0 (T_{с.н.}^4 - T^4), \quad (28)$$



где  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  
 $\varepsilon$  – степень черноты поверхности катодного блока;  
 $T_{s.n}$  – температура на поверхности электронагревателя °С;  
 $T$  – температура катодного блока, °С.

В области электронагревателя теплообмен учитывается дифференциальным уравнением Фурье – Кирхгофа (27) без конвективных членов.

В области футеровки теплообмен происходит за счет теплопроводности и учитывается уравнением (27) без членов, учитывающих конвекцию и мощность тепловыделения внутренними источниками теплоты.

Решению уравнений тепловой задачи во всей области предшествует процедура задания краевых условий и приложения нагрузок в начальный момент времени  $t^0$ .

В качестве граничных условий задается закон теплообмена с окружающей средой на внешней поверхности катодного блока, а так же с окружающей средой на внешние поверхности металлокаркаса установки нагрева катодных блоков.

$$q_{o.s} = a \cdot (T_{пов} - T_{o.s}), \quad (29)$$

$$q_{ок-мет.} = a \cdot (T_{мет} - T_{o.s}), \quad (30)$$

где  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $T_{o.s}$  – температура окружающей среды, °С;  
 $T_{пов}$  – температура поверхности катодного блока, °С;  
 $T_{мет}$  – температура металлокаркаса установки, °С.

При этом коэффициент теплоотдачи  $a$  определяется, как:

$$a = a_0 + a_1 + (T_{пов} - 30) - a_2 (T_{пов} - 30)^2 + a_3 (T_{пов} - 30)^3, \quad (31)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – постоянные коэффициенты, зависящие от вида теплоотдающей поверхности.

Начальным моментом времени решения задачи принимается момент загрузки катодных блоков, электронагреватели выделяют наименьшую мощность и температура в внутривспечном пространстве минимальна. По этой причине температура, задаваемая на нагревательных элементах  $T_{n.e}^0$  электронагревателя равна соответственно 800°С а, температура окружающей среды  $T_{o.s}^0$  принимается равной 20 °С. Физические свойства материалов (при  $T=750$  °С).

Футеровка боковой стенки:

теплопроводности слоя:  $\lambda=0,22$  Вт/(м·°С);

плотность слоя:  $\rho=200$  кг/м<sup>3</sup>;

теплоемкости слоев:  $c=1100$  Дж/(кг·°С);

коэффициент черноты поверхности  $\varepsilon = 0,8$ .

Электронагреватель:

теплопроводности элементов:  $\lambda_{нэ} = 63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ;

плотности элементов:  $\rho_{нэ} = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

теплоемкости элементов:  $c_{нэ} = 720 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ ;

коэффициент черноты поверхности  $\varepsilon = 0,8$ .

Внутрипечное полое пространство:

теплопроводность воздуха:  $\lambda_{г} = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ;

плотность  $\rho_{г} = 0,3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

теплоемкость  $c_{г} = 1170 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ ;

### 3.4 Результаты математического моделирования

Первые результаты математического моделирования были получены для блока для времени нагрева 100 минут. Было изучено влияние степени экранирования. Благодаря экранам можно уменьшить интенсивность теплового излучения.  $N_{\text{экр}}$  – степень экранирования, в зависимости от прорези трубы. Были рассмотрены варианты: с закрытой трубой; вариант с раскрытием прорези ( $22^\circ$ ); вариант с раскрытием прорези; вариант без трубы ( $45^\circ$ ).

[изъято 2 страницы]

Результаты температуры при различных степенях экранирования были взяты в двух точках А и С, показанных на рисунке 14.

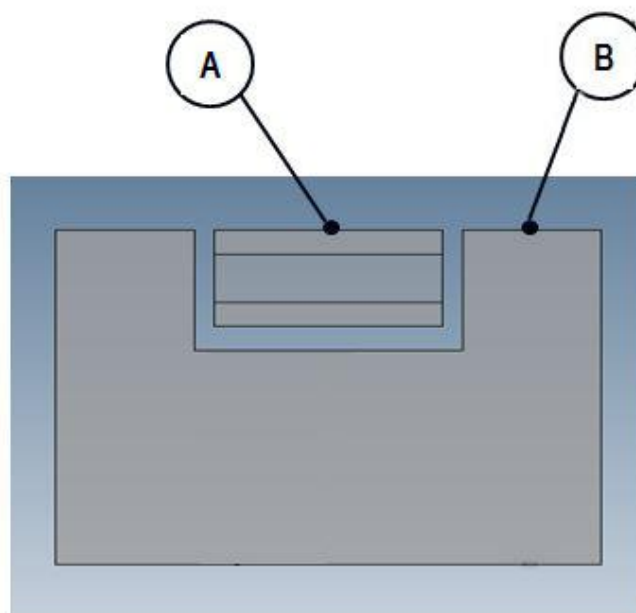


Рисунок 14 – Точки, в которых были взяты температуры

В зависимости от степени диафрагмирования были получены различные результаты, а именно, изменяется температура блока и бьюмса. При времени равном 9000 сек. температура блока, бьюмса, бьюмса и спуска увеличивается при присутствии штор по бокам, степень диафрагмирования в данном случае равна 1.

[изъято 5 страниц]

## 4 Электрический расчет

### 4.1 Электрический расчет нагревателя

Производим электрический расчет по заданным параметрам, которые приведены в таблицы 7.

Таблица 7 – Параметры электронагревателей

Количество нагревателей	8
Число сегментов, шт	20
Полная длина, м	73,6
Длина сегмента l, м	3,680
Диаметр D, мм	0,0080
Площадь сечения $S_1, \text{м}^2$	0,00005024
Площадь поверхности $S_2, \text{м}^2$	1,84883
Коэффициент k	1,070
Удельное сопротивление (холодное) $\rho_{\text{хол}}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	1,999
Удельное сопротивление (горячее) $\rho_{\text{гор}}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	0,00000146
Сопротивление (основное) $\rho_{\text{гор}}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	2,139
Напряжение питания U, В	328

Согласно заданным значениям найдем величину тока, согласно формуле:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (23)$$

где  $U$ – напряжение, В;  
 $R$ –сопротивление, Ом.

$$I = \frac{380}{2,01} = 189,47 \text{ А.}$$

Найдем величину мощности по формуле:

$$P = U \cdot I \quad (24)$$

где  $U$ – напряжение, В;  
 $I$ –сила тока, А.

$$P = 328 \cdot 189,7 = 72000 \text{ Вт.}$$

Ватная нагрузка рассчитывается, исходя из формулы:

$$w = \frac{P}{S_2} \quad (25)$$

где  $P$  – мощность, Вт;

$S_2$  – площадь поверхности нагревательного элемента, см<sup>2</sup>

$$w = \frac{72000}{18488,3} = 3,89 \text{ Вт/см}^2.$$

Полная мощность рассчитывается из того, что мощность одного нагревателя составляет 72000Вт, в установке их 8 шт. Рассчитываем полную мощность:

$$P_{\text{полн}} = P \cdot 8 = 72000 \cdot 8 = 576000 \text{Вт}.$$

#### 4.2 Исследование промышленного образца установки

Электрические и технические параметры установки предварительного нагрева катодных секций были рассчитаны выше.

Согласно данным расчетам установка была изготовлена и смонтирована.

В настоящее время данная установка эксплуатируется в компании ООО “Русал – Иркутск” в течении одного года.

Результаты полученные при отладке режимов работы в промышленной установке следующие:

1) Определена величина мощности, приемлемая с точки зрения технологии и обеспечения надежности работы системы нагрева  $P=85\%$ .

2) Выполнена индивидуальная подстройка установленной мощности на 1 – 4 линиях, позволяющая проводить нагрев с одинаковым темпом прироста температуры:

1 1-я линия: 82%;

2 2-я линия: 85%;

3 3-я линия: 83%;

4 4-я линия: 85%.

[изъято 4 страницы]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была решена основная задача: неравномерный нагрев катодных секций.

Осуществлен выбор наиболее эффективной теплоизоляции установки предварительного нагрева катодных секций. Были использованы теплоизоляционные блоки из керамического волокна марки ТБКВ, данный материал обладает высокой стойкостью и длительным сроком службы, повышает производительность и обеспечивает надежность при работе установки предварительного нагрева катодных секций.

В данной работе произведен расчет теплового КПД установки, он необходим для того, чтобы оценить эффективность системы нагрева.

В результате математического моделирования, приведенного в главе 3, были подтверждены технические решения.

[изъято 4 абзаца]

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Альтгаузен, А. П. Электротермическое оборудование: справочник / А. П. Альтгаузен, М. Я. Смелянского, М. С. Швецов. – М.: «Энергия», 1967. – 448 с.

Белай, Г. Е. Организация металлургического эксперимента: учебное пособие для вузов / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко. – М.: «Металлургия», 1993. – 256 с.

Гречко, А. В. Практика физического моделирования на металлургическом заводе / А. В. Гречко, Р. Д. Нестеренко, Ю. А. Кудинов. – М.: «Металлургия», 1976. – 224 с.

Кручинин, А. М. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов / А. М. Кручинин, К. М. Махмудов, Ю. М. Миронов. – М.: «Энергоатомиздат», 1990. – 416 с.

Марков, Б. Л. Физическое моделирование в металлургии / Б. Л. Марков, А. А. Кирсанов. – М.: «Металлургия», 1984. – 119 с.

Свенчанский, А. Д. Электрические печи сопротивления: учебник для вузов / А. Д. Свенчанский. – М.: «Энергия», 1975. – 384 с.

Свенчанский, А. Д. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич. – М.: «Энергоиздат», 1982. – 400 с.