



#### РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ КОРОТКОЙ СЕТИ И УЗЛА ЭЛЕКТРОДОДЕРЖАТЕЛЯ ПЕЧИ РКО-25

Заказчик: ТНК «КАЗХРОМ» Аксуский завод ферросплавов

Наименование объекта: Электропечи РКО -25 Цех №4 Аксуского завода ферросплавов

Новосибирск 2010 г.

ЗАО «Электротерм»»

# Содержание

		Стр.
	Введение	4
1	Самообжигающийся электрод	6
2	Определение путей решения задачи достижения	
	наилучших условий коксования электродной массы	18
3	Анализ вторичного токоподвода	30
	3.1 Проверка сечения токопроводящих элементов	30
	3.2 Расчёт активного и индуктивного сопротивлений	
	вторисного токоподвода	33
	3.3 Проверка компенсатора нажимного	49
	3.4 Анализ контактной щеки и бокового экрана	51
4	Расчёт диаметра электрода	52
	4.1 Расчёт диаметра электрода d <sub>э</sub> ,	
	исходя из мощности печи S	52
	4.2 Расчёта рабочих электрических параметров	
	печи по методике, предложенной в [19]	56
	4.3 Расчёт электрических и геометрических параметров	
	печи без использования УПК	57
	4.4 Расчёт электрических и геометрических параметров	
	печи, исходя из диаметра электрода и $\cos \varphi = 0.92$	59
	4.5 Расчёт электрических и геометрических параметров	
	печи, исходя из диаметра электрода	
	и естественного $\cos \varphi$	59
	ЗАО «Электро	терм»

	🥮 ЗАО «Электро	Tepm»
5	Расчёт аэродинамики системы обдува электрода	61
	5.1 Математическая модель задачи	61
	5.2 Результаты решения аэродинамической задачи	65
	5.3 Анализ результатов и рекомендации	125
	5.4 Изменения, предлагаемые внести в конструкцию узла	126
6	Электромагнитный расчёт электропечи как одного из состав-	
	ляющих элементов расчёта теплового поля электрода	131
	6.1 Исходные данные	131
	6.2 Математическая модель задачи	132
7	Расчёт теплового поля электрода	138
	7.1. Математическая модель задачи	138
	7.2. Используемое программное и аппаратное обеспечение	139
	7.3. Результаты решения тепловой задачи	140
	7.4. Анализ результатов и рекомендации	158
8	Рекомендации	160
	Список литературы	163



#### Введение

Данный отчёт составлен по результатам работы, выполненной по теме «Разработка и проектирование оптимальной конструкции корот-кой сети и узла электрододержателя печи РКО-25 плавильного цеха №4 Аксуского завода ферросплавов АО «ТНК «Казхром»». Работа проводилась на основании:

- Задания на проектирование «АО «ТНК «Казхром» Аксуский завод ферросплавов. Разработка и проектирование оптимальной конструкции короткой сети и узла электрододержателя печи РКО-25 плавильного цеха №4» от 11 марта 2010 г, выданного АО «ТНК «Казхром»;
- Спецификации «Разработка и проектирование оптимальной конструкции короткой сети и узла электрододержателя печи РКО-25 плавильного цеха №4»;
- 3. Договора №Н-12/12 от 07.06.2010г.

Основной целью проводимой работы является выдача рекомендаций по изменению существующей конструкции короткой сети и узла электрододержателя печи РКО-25 с целью достижения наилучших условий коксования электродной массы на печах цеха №4, что позволило бы снизить аварийность на самообжигающихся электродах конструкции Содерберга.

Для решения поставленной задачи использовано компьютерное моделирование, работающее с трёхмерными моделями. При этом следует отметить, что задача достижения наилучших условий коксования электродной массы была рассмотрена в более широком диапазоне, чем это обозначено в задании, т.е. не только через оптимизацию короткой сети и узла электрододержателя. Поэтому построенная на начальном этапе работы исходная сборочная 3-D модель включает в себя 3-D модели короткой сети, токоподвода, электрода и гидроподъёмника.

# 🖳 ЗАО «Электротерм»

Примечание – 3-D модель устройства перепуска не строилась, т.к. данное устройство оказывает на электрод воздействие только в качестве исполнительного механизма по его удержанию и перепуску.

Построение 3-D модели производилось на базе информации, изложенной в Приложении А. При построении модели, был допущен ряд упрощений, не влияющих на конечный результат расчётов:

- при построении модели короткой сети отображены только токопроводящие элементы. Вывода НН трансформатора в модели не строились;
- 2) при построении модели токоподвода не отображены кронштейны крепления токоподводящих труб к токоподводу (разрез «Б-Б» на чертеже п/п 6.2) и подвески кольца нажимного. Кроме того, нижние защитные экраны (в связи с отсутствием чертежей) представлены как сплошные тела, при этом в расчётах они учитываются, как тела, нагретые до температуры 50°С и сохраняющие эту температуру постоянной независимо от воздействия колошника;
- при построении модели гидроподъёмника отображены только кожух несущий (поз.1 на чертеже п/п 5.1), кожух промежуточный (соединяет кожух несущий гидроподъёмника с токоподводом) и воздухораспределительный коллектор траверсы;
- при построении модели электрода за максимальный уровень электродной массы был взят уровень массы равный 2,5 м.
   Исходная 3-D модель представлена в Приложении В на рисунке 1.

#### 1 Самообжигающийся электрод

ЗАО «Электротерм»

Для правильного понимания и определения путей достижения поставленной цели проанализируем самообжигающегося электрода конструкции Содерберга как изделие, свойства которого либо изменяются под воздействием определённых факторов, либо можно изменять воздействием набора определённых инструментов (в нашем случае изменение конструкции короткой сети и конструкции электрододержателя). При этом анализ проведём с учётом действующей на Аксуском заводе ферросплавов производственно-технической инструкции по эксплуатации саообжигающихся электродов открытых и закрытых печей.

1.1 Самообжигающийся электрод конструкции Содерберга (далее по тексту «электрод») есть устройство, через которое непосредственно осуществляется подвод электрической энергии в плавильное пространство рудовосстановительных печей.

1.2 Конструктивно электрод представляет собой цилиндрический кожух с приваренными внутри продольными ребрами. Кожух электрода и рёбра изготавливают из листовой стали, при этом кожух изготавливается в виде отдельных секций, свариваемых впоследствии друг с другом газоплотным швом. Внутренне пространство кожуха на определённую высоту периодически загружается электродной массой, которая, проходя различные температурные зоны по мере перепуска электрода, претерпевает структурные изменения и превращается в скоксованный монолит.

На электропечах РКО-25 используются электроды, несущий кожух которых имеет следующие технические характеристики:

-	диаметр (наружный), мм	- 1400;
-	толщина обечайки кожуха, мм	- 4;
-	количество рёбер, шт.	- 13;

ЗАО «Электротерм»

	1 - E	ЗАО «Электротерм»
-	ширина ребра, мм	- 195;
-	толщина ребра, мм	- 4;
-	допустимые отклонения изготовленных ко:	жухов
	не должны превышать:	

- по диаметру ± 2 мм;
- по периметру ± 6 мм.

- кожух (по техническим стандартам завода) должен иметь строго цилиндрическую форму и ровную поверхность, свободную от окалины.

В качестве электродной массы в последние годы на заводе используется электродная масса следующих поставщиков: ОАО «Укрграфит», г. Запорожье; ТОО «Химпром-2030», г. Тараз. К поставляемой электродной массе предъявляются следующие требования (не хуже):

а) для электродной массы класса «А»:

	• коэффициент текучести	- 1,6-2,8;
	• массовая доля летучих веществ, %	- 12-18;
	• массовая доля золы, % не более	- 7;
	• удельное электрическое	
	сопротивление, мкОм м, не более	- 90;
	• предел прочности	
	на разрыв, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее	- 1,47(15);
б)	для электродной массы класса «С»:	
	• коэффициент текучести	- 1,8-2,8;
	• массовая доля летучих веществ, %	- 13-16;
	• массовая доля золы, % не более	- 6;
	• удельное электрическое	
	сопротивление, мкОм·м, не более	- 80;
	• предел прочности	
	на разрыв, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менее	- 1,76(18).
	Масса поставляется в виде брикетов.	
		ЗАО «Электротерм»

Ше ЗАО «Электротерм» При загрузке электродной массы в кожух электрода, за нулевой уровень массы в электродах принят верхний обрез контактных щек. При этом уровень массы в кожухе поддерживают в значениях:

а) зимой:

	• минимально допустимые уровни, м, не менее	- 1,8;
	• уровни, требующие догрузки, м	- 2,3;
	• уровни после загрузки, м, не более	- 2,8;
б)	летом:	
	• минимально допустимые уровни, м, не менее	- 2,0;

- уровни, требующие догрузки, м 2,5;
- уровни после загрузки, м, не более 3,0.

Примечание - При отклонениях от нормального режима эксплуатации электродов (например, работа печи без газоочистки, устойчивое повышение температуры в летний период, скопление пека выше зоны коксования и т. д.), а также для исключения подвисания массы (при переплаве мелочи, холодном ходе печи или при использовании массы с низким коэффициентом текучести) положение максимального уровня массы может быть изменено.

После загрузки брикетов электродной массы в кожух (Зона I на рисунке 1.1), по мере перепуска электрода, масса нагревается, а связывающий массу компонент – пек - плавится. Температура плавления пека 60-65°С. По мере нагревания электродной массы вязкость пека уменьшается и при температуре около 100°С масса приобретает пластические свойства. Под собственным весом и весом давящих сверху брикетов электродная масса растекается и заполняет объем кожуха. При температуре 150°С она становится практически текучей и находится в жидком состоянии (Зона II на рисунке 1.1). Достигнув температуры 350-400°С, масса начинает коксоваться (Зона III на рисунке 1.1).

ШЕ ЗАО «Электротерм» Из пека, смачивающего твердые компоненты, входящие в состав массы, начинают отгоняться летучие вещества, и образуется твердая решетка полукокса, связывающая все зерна массы в единое целое. Отход летучих веществ в основном завершается при температуре около 800°С. Газы из зоны коксования (Зона IVa на рисунке 1.1) выходят через поры уже скоксованного электрода и за счет пиролиза значительно улучшают его качество. По мере коксования электрическое сопротивление угольной части электрода снижается. До температуры 800°С ток в основном идет по кожуху, при более высокой температуре ток проходит по скоксованного блока и кожуха становятся соизмеримыми [1, 2].

Таблица 1.1 – Качественная оценка сравнения электросопротивления железного кожуха и угольного блока в зависимости от температуры

Токопроводящая	Сопротивление 1 см длины (в относитель-					
деталь	ных единицах) при температуре , <sup>о</sup> С					
	420	500	600	700	900	1000
Железный кожух	1,0	1,2	1,34	1,5	1,82	2,0
Угольный блок	≈ 185	pprox 78	$\approx 50$	≈16	≈ 2,6	≈ 2,01

Таким образом, при движении электродной массы вниз в процессе опускания электрода (по мере его расходования) свойства электродной массы с ростом температур претерпевают весьма существенные физико-химические изменения. Примерная картина расположения зон состояний электродной массы (агрегатных и структурных) в зависимости от температуры по высоте электрода при условии нормального коксования электрода представлена на рисунке 1.1. Нормальное коксование электрода, обеспечивающее получение качественного электрода, характеризуется (по результатам многочисленных исследований [5]) следующими признаками:



a) в контактные щёки электрод поступает «пластичным», т.е. электродная масс должна иметь температуру 150-250<sup>0</sup>С;

ЗАЛ «Электпотелм»

б) в области контактных щёк примерно на половине их высоты электродная масса находится ещё в достаточно пластичном состоянии (350 -550<sup>0</sup>C);

в) в нижней половине щек электрод закоксован так, чтобы он мог сопротивляться раздавливающим усилиям щёк. При этом зона 800-900<sup>о</sup>С находится на уровне трети высоты щеки (от её нижнего торца), что обеспечивает при зажатии электрода щёками надлежащий контакт из-за некоторой деформации пластичного в верхней половине щёк тела электрода;

г) при выходе из контактных щёк температура электрода не превышает 900-1100 $^{0}$ C.

Характер расположения зон, в которых происходят изменения физико-химических свойств электродной массы (по мере её продвижения вниз) свидетельствует о том, что при эксплуатации самообжигающихся непрерывных электродов процессы формирования и обжига электрода совмещены. Такое положение вещей требует умелого управления этими режимами. Так, например, если при изготовлении прессованных «зелёных» электродов, имеется возможность (в силу технологии изготовления) раздельного регулирования этих процессов и возможность устанавливать необходимый режим нагрева, продолжительность изотермической выдержки и т.д., то при изготовлении самообжигающихся электродов выбор оптимального температурного режима обжига – сложная задача. Для решения этой задачи, с целью обеспечения нормального обжига электрода, необходимо знание статей теплового баланса прихода и расхода тепла при коксовании электрода. Примерная качественная оценка теплового баланса обжига электрода, полученная на основании многочисленных экспериментов [2, 3, 5], представлена в

таблице 1.2.

Таблица 1.2 –	Качественная	оценка	теплового	баланса	обжига	элек-
	трода (без кон	кретно	й привязки н	к печам Р	КО-25)	

Статья прихода	Приход	Статья расхода	Расход
	тепла		тепла
1 Теплопередача из по- дэлектродного про- странства по обожжён- ному электроду	4 - 6%	1 Тепло от нагрева и коксования электродной массы	2-6%
2 Джоулевое тепло от прохождения тока по кожуху электрода и скоксованной части электрода	70 – 75%	2 Потери с водой, охла- ждающей контактные щёки	до 80%
3 Тепло выделяемое в контакте «щека – элек- трод	20 – 25%	3 Потери с боковой по- верхности электрода (зашихтованной и неза- шихтованной)	до 10%
		4 Потери с воздухом, охлаждающим электрод	до 3%

В дополнение к вышесказанному необходимо отметить, что на действующих печах РКО-25 цеха №4 имеет место ряд дополнительных факторов, влияющих на процессы формирования и обжига электрода и являющихся спецификой печей такого типа. Это конструктивные особенности этих печей – закрытый токоподвод (т.н токоподвод «капсульного» типа) и форма ванны печи.

*Токоподвод*. Токоподвод печи РКО-25 имеет десять водоохлаждаемых медных контактных щёк. Прижатие щёк к кожуху электрода осуществляется гидроприжимом, в связи с чем, выделение тепла в контакте «щека-электрод» незначительное. Для защиты нажимного кольца от теплового воздействия, кольцо снизу защищено водоохлаждаемыми

экранами. Для этих же целей, а также для защиты контактных щёк и их подвесок, вокруг кольца установлены шесть боковых водоохлаждаемых экранов. Таким образом, интенсивное охлаждение узла токоподвода, в том числе и контактных щёк, приводит к тому, что коксование электродов происходит практически на выходе из контактных щек. При этом высота зоны коксования электродной массы (расстояние между изотермами 400-800°С) не превышает 100 мм. Коксование электрода на таком низком уровне приводит к тому, что при перепусках электрода из контактных щёк возможен выход не полностью скоксованного электрода. Узость зоны коксования, а также низкое положение этой зоны относительно нижней кромки контактной щеки говорят о том, что зона 350-550°C тоже смещена вниз и находится в нижней половине контактной щеки. В этом случае логично полагать, что и зона «жидкого» состояния электродной массы также смещена вниз и попадает в область контактных щёк. Кроме этого, информация, изложенная в п. 11 Приложения А, свидетельствует о том, что высота зоны «жидкой» электродной массы (при нарушении режима спекания) может быть значительна и даже может распространяться в зону, где электродная масса должна быть в твёрдом состоянии.

*Круглая ванна*. Особенностями эксплуатации электродов в трёхфазных рудовосстановительных печах с круглой ванной является ассиметричное расположение зоны коксования, выражающееся в перекоксовании участков электрода, обращённых к центру печи и недокососвание противолежащих участков [6, 7]. Ассиметрия теплового поля является следствием нескольких факторов:

1. Эффект близости, т.е. «стягивание» токов в направлении оси ванны;

2. Неравномерные граничные условия по периметру электрода – в центре ванны печи и поверхности колошника температура выше, чем

ЗАЛ «Электпотерм»



на периферийных зонах;

3. Неравномерное распределение тока по элементам токоподвода. Здесь в основном влияют длина и местоположение токопроводящего элемента в пространстве, т.е. факторы, определяющие собственную и взаимную индуктивности токопроводящих элементов. Доказано, что основным фактором в этом случае является транспозиция участка трубошин, дающая до 60% общего индуктивного сопротивления токоподвода, - см. таблицу 1.3.

Таблица 1.3 - Пример распределения реактивного сопротивления по участкам токоподвода, полученного по результатам исследования [8]

Сопротивление участков, в %		Полное сопротивление	
Хт	Хгт	Хкщ	
61	12,1	23,1	100%
Хт – реакт	ивное сопрот	гивление учас	стка трубошин,
Хгт – реак	тивное сопро	тивление уча	астка гибких токоподводов,

Хк - реактивное сопротивление контактных щёк.

Примечание - Из реальной картины расположения контактных щёк (см. рисунок 1.2) и токоподводящих труб на токоподводах печей РКО-25 (см. рисунок 1 Приложения В) видно, что при конструировании токоподводов были сделаны попытки рационального расположения труб. Однако, при этом совершенно не учитывалась оригинальная конструкция короткой сети, а также безбашмачное соединение трубошин «жёсткого» пакета короткой сети с трубами токоподвода.

Таким образом, с учётом вышеприведённых факторов фактическая картина расположения тепловых зон в электродах печей РКО-25 должна иметь вид, представленный на рисунке 1.3.



Рисунок 1.2 - Схема расположения контактных щёк на электродах печей РКО-25.
Чёрным цветом выделены контактные щёки, к которым подводятся трубошины короткой сети, соединённый по схеме «2 трубошины – 3 вывода НН трансформатора».
Белым цветом выделены контактные щёки, к которым подводятся трубошины короткой сети, соединённые по схеме «3 трубошины – 3 вывода НН трансформатора».

1.3 *Аварии на электродах*. Работа электрода, как и любого устройства, может быть штатной и аварийной. Наиболее частые аварии, имеющие место на электродах - это облом, обрыв электродов и отгар (отжог) электродов.

1.3.1 Облом, обрыв электрода являются наиболее распространенными видами аварий, вызванные разрушением электрода по скоксованной части. Основными причинами обрывов, обломов являются:

a) создание механически слабой и термически нестойкой угольной части электрода, в результате применения некачественной электродной





массы или различных нарушений при формировании электрода (подвисание и расплавление массы, неравномерный и усиленный перепуск, нарушения в обдувке электродов и т. д.);

 б) воздействие на электроды температурными ударами, вызывающими в них термические напряжения, в результате быстрого охлаждения электродов при простоях, при попадании воды на электроды или при перегрузах по току;

возникновение в электродах механических напряжений, в результате перемещения его в залитом водой или застывшем на простое колошнике, а также при неравномерной завалке шихты;

 г) появление в электродах расслоений, вызванных скоплениями пыли, попадающей во внутреннее пространство электрода через неприкрытый верхний торец кожуха электрода.

1.3.2 Отжог электрода – разрушение электрода в результате превышения допустимой токовой нагрузки на недостаточно скоксованный блок, что приводит к прогоранию стального кожуха с выходом или без выхода жидкой массы. Возможно частичное или полное разрушение кожуха электрода. Отжог электрода возможен и по скоксованной части, в случае образования неоднородной структуры с повышенным электрическим сопротивлением.

Основными причинами отжогов являются:

a) превышение токовой нагрузки на плохо скоксованном электроде выше допустимого для кожуха предела;

б) некачественная сварка секций кожуха и внутренних ребер;

 в) контакт кожуха электрода с заземленными металлоконструкциями печной установки или околопечной обстановки;

г) плохой контакт щека – электрод.

#### 2 Определение путей решения задачи достижения наилучших условий коксования электродной массы

ЗАО «Электротерм»

Проведённый в п.1 настоящей записки анализ электрода как изделия, свойства которого либо изменяются под воздействием внешних факторов, либо можно изменять воздействием определённых инструментов позволяет нам определить пути решения поставленной задачи, для этого рассмотрим вышеизложенные факторы с точки зрения их конкретного влияния на качество получаемого электрода, а также с точки зрения возможности влияния на эти факторы оптимизацией конструкции короткой сети и электрододержателя. Результаты анализа представлены в виде таблицы 2.1.

Таблииа 2.1

Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор оптимизацией конструкций корот- кой сети и электро- додержателя
А) Тепловой бал 1. Теплопередача из под электродного простран- ства по обожжённому электроду – так назы- ваемый «подсос тепла из тигля»	танс (приход тепла – см. Размеры реакцион- ных зон и тиглей, об- разующихся вокруг электрода, зависят главным образом от электрического режима работы, диаметра элек- тродов и передаваемой ими в ванну РВП мощ- ности. Как известно, каждому процессу про- изводства того или иного сплава соответ- ствует определенное оптимальное распреде- ление напряженности	таблицу 1.2) Изменение диаметра электрода, и, следова- тельно, изменение га- баритов токоподвода, определяемых диамет- ром электрода
	ление напряженности электрического поля*,	



Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор оптимизацией конструкции корот- кой сети и электро- додержателя
	плотности тока* и объ- емной удельной мощ ности в реакционных зонах*, а также опре- делённое распределе- ние тока между шихтой и дугой. Это определя- ет определённый ре- жим плавки, обеспечи- вающий рациональное распределение тепла в ванне печи, а значит, и оптимальную глубину посадки электродов*, обеспечивающую со- хранение такого режи- ма.	
	* Данные величины яв- ляются различными функциями от диамет- ра электрода [9].	
	Примечание - При на- личии всех факторов, влияющих на тепловое поле электрода, «под- сос тепла» из тигля оказывает существен- ное влияние на темпе- ратуру в центре элек- трода (особенно если учесть наличие в элек- троде эффекта бли- зости и скин-эффекта)	



# 进: ЗАО «Электротерм»

Продолжение таблицы 2.1

Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор оптимизацией конструкции корот- кой сети и электро- додержателя
2. Джоулевое тепло от прохождения тока по кожуху электрода и скоксованной части электрода	Основная статья при- хода тепла. Коксование электродной массы идёт в основном за счет тепла от прохождения тока по электроду и кожуху (до 75 %). В дифференциальной форме закон Джоуля- Ленца записывается в виде w = jE где: w – удельная тепловая мощность тока; j – плотность тока; E – напряжённость электрического поля. При этом ј есть функция от диаметра электрода.	Изменение диаметра электрода, и, следова- тельно, изменение га- баритов токоподвода, определяемых диамет- ром электрода
3. Тепло выделяемое в контакте «щека – электрод»	Одним из наиболее ответственных элемен- тов рудовосстанови- тельной электропечи является электрокон- тактный узел, вклю- чающий участок элек- трода, контактные ще- ки и устройство для их прижатия. Из практики эксплуа- тации самообжи- гаю- щихся электродов из- вестно, что условия работы контактного	



узла влияю жение электр тельно опредность трода ной ус В г электр троду менны ский т к его ности. электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помоц ма, о равной	существенно г на местополо- зоны спекания ода и, следова- о, во многом еляют надеж- работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
Влияю жение электр тельно опредность трода ной ус В п электр троду менны ский т к его ности электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода	г на местополо- зоны спекания ода и, следова- о, во многом сляют надеж- работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
жение электр тельно опред ность трода ной ус В г электр троду менны ский т к его ности электр ляется ных в распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помон ма, ос равноя янное	зоны спекания ода и, следова- о, во многом сляют надеж- работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
электр тельно опредность трода ной ус В п электр троду менны ский т к его ности. электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помон ма, о равноя янное	ода и, следова- о, во многом еляют надеж- работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводит оверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
тельно опредность трода ной ус В п электр троду менны ский т к его ности электр ляется ных в распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помон ма, о равноя	о, во многом сляют надеж- работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек, агающиход рор	
опредность трода ной ус В г электр троду менны ский т к его ности. электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помон ма, о равноя янное	еляют надеж- работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
ность трода ной ус В г электр троду менны ский т к его ности. электр ляется ных в распол номер ружно уровна мых к с опр лием. Прижи вой па трода осуще помон ма, о равноя янное	работы элек- и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
ной ус В п электр троду менны ский т к его ности электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижн вой по трода осуще помон ма, о равноя янное	и электропеч- тановка в целом. роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
В п электр троду менны ский т к его ности. электр ляется ных в распол номер ружно уровне мых к с опр лием. Прижн вой по трода осуще помон ма, о равноя янное	роцессе работы опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
электр троду менны ский т к его ности электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равноя янное	опечи по элек- проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
троду менны ский т к его ности. электр ляется ных в распол номер ружно уровне мых к с опр лием. Прижн вой по трода осуще помон ма, о равноя янное	проходит пере- й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
менны ский т к его ности. электр ляется ных в распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равноя янное	й электриче- ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
ский т к его ности электр ляется ных н распол номер ружно уровне мых к с опр лием. Прижн вой пе трода осуще помон ма, о равноя янное	ок, подводимый боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
к его ности электр ляется ных в распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равноя янное	боковой поверх- Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
ности электр ляется ных н распол номер ружно уровне мых к с опр лием. Прижн вой пе трода осуще помош ма, о равноя янное	Подвод тока к оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
электр ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равном янное	оду осуществ- с помощью мед- онтактных щек,	
ляется ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равноя янное контан	с помощью мед- онтактных щек,	
ных н распол номер ружно уровно мых к с опр лием. Прижн вой по трода осуще помош ма, о равном янное	онтактных щек,	
распол номер ружно уровна мых к с опр лием. Прижи вой па трода осуще помош ма, о равном янное контан	araioiiiiavon nor	
номер: ружно уровна мых к с опр лием. Прижи вой па трода осуще помон ма, о равном янное	агающихся рав-	
ружно уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равном янное контан	ю по его ок-	
уровно мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равном янное контай	сти на одном	
мых к с опр лием. Прижи вой по трода осуще помош ма, о равном янное контан	и прижимае-	
с опр лием. Прижн вой по трода осуще помош ма, о равном янное контан	его поверхности	
лием. Прижн вой по трода осуще помош ма, о равном янное контан	зделенным уси-	
вой по трода осуще помош ма, о равном янное контан	и шёк к боко-	
трода осуще помош ма, о равном янное контан	м щек к обко-	
осуще помош ма, о равном янное контан	на печах РКО-25	
помоц ма, о равно янное контан	ствляется при	
ма, о равно янное контан	и гидроприжи-	
равном янное контан	беспечивающего	
янное контан	ерное и посто-	
конта	нажатием на все	
	тные щеки.	
Практ	кой установле-	Проверка усилия
но, что	ля обеспече-	развиваемого компен
		сатором нажимным,



Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор оптимизацией конструкции корот- кой сети и электро- додержателя
	ния стабильного хорошего электрического контакта «щека - элек- трод» необходимо удельное давление в контакте 0,98 – 1,96 МПа (1 – 2 кгс/см <sup>2</sup> ) [11]. Однако, наряду с удельным давлением в контакте, необходимо учитывать и состояние контактирующих по- верхностей, которое характеризуется сле- дующими условиями [12]: 1) ввиду наличия мик- ро- и макронеров- ностей соприкоснове- ние контактирующих поверхностей проис- ходит в отдельных точках, образующих пятна фактического контакта; 2) загрязнение контак- тирующих поверхно- стей, образующееся вследствие попадания пыли в зону контакта, ведет к уменьшению поверхности фактиче- ского контакта и уве- личению термическо- го и электрического сопротивления кон- такта	прижимающим кон тактные щёки к боко вой поверхности элек трода и, при необходи мости, изменение кон струкции нажимног компенсатора Изменение конст рукции контактны щёк в соответствие последними тенден циями мирового пече строения. Доказано что отгибы, выполняе мые в верхней част контактных щёках, иг рают отрицательнун роль, способствуя на коплению пыли и по следующему затягива нию пыли в место кон такта

ЗАО «Электротерм»



Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор оптимизацией конструкции корот- кой сети и электро- додержателя
	3) передача тепла через	
	зону контакта осуществ-	
	ляется двумя путями:	
	теплопроводностью	
	непосредственно че-	
	рез пятна фактиче-	
	ского контакта и че-	
	рез среду, заполняю-	
	щую впадины неров-	
	ностей контактирую-	
	щих поверхностей.	
	Таким образом при	
	анализе контакта «ще-	
	ка - электрод» необ-	
	ходимо учитывать два	
	фактора:	
	- удельное давление в	
	месте контакта;	
	- тепловой и электри-	
	ческий контакт между	
	контактирующими	
	поверхностями.	
	При хорошем элек-	
	трическом и тепловом	
	контактах между дву-	
	мя контактирующими	
	поверхностями за счёт	
	регулирования удель-	
	ного давления можно	
	регулировать количе-	
	ство тепла, отводи-	
	мого контактными	
	щёками из зоны кон-	
	такта, и таким обра-	
	зом влиять на поло-	
	жение зоны коксова-	
	НИЯ.	



Фактор, влияющии на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор оптимизаци конструкции корот- кой сети и электро- додержателя	
	При плохом тепло- вом и электрическом контактах картина рез- ко меняется. Плохой контакт приводит к увеличению количества тепла, выделяющегося в контакте «щека- электрод», что, вроде бы, должно повышать температуру электрода в этом месте. Однако, наличие теплоизоли- рующей поверхности приведёт к обратному эффекту - практически всё это тепло будет от- ведена водоохлаждае- мыми контактными щёками. Кроме того, плохой контакт приво- дит к появлению мик- родуг между щекой и кожухом электрода, что может вызвать преждевременный вы- ход из строя контакт- ных щек или прожиг		
<ul><li>Б) Тепловой ба.</li><li>1. Тепло на нагрев и</li></ul>	ланс (расход тепла – см. Тепло, используе-	таблицу 1.2) Определяется соста-	
коксование электродной массы	мое на нагрев и кок- сование электродной массы	вом электродной мас- сы; в рамках постав- ленной задачи - не рассматривается	



Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор при оптимиза- ции конструкций короткой сети и электрододержателя
2. Потери с водой, охлаждающей контактные щёки	Основная статья от- вода тепла, посту- пающего в электрод. Количество тепла, отводимого контакт- ными щёками в этом случае можно изме- нять. Здесь возможны два варианта воздей- ствия: 1 – изменение пло- щади контактной ще- ки, а, следовательно, и изменение плотно- сти тока в зоне кон- такта «щека - элек- трод». Практикой ус- тановлено значитель- ное влияние плотно- сти тока в зоне кон- такта на положение изотермы 800°С в це-	Изменение ширины контактной щеки или изменение конфигура- ции контактной щеки
	лом; 2 – изменение рас- хода охлаждающей воды. Уменьшение расхода охлаждающей воды не оказывает существенного влия- ния на температуру в центре электрода, но повышает температу- ру периферийных слоёв электрода [13]	В рамках поставлен- ной задачи - не рас- сматривается

ЗАО «Электротерм» 25



## 🕑 ЗАО «Электротерм»

Продолжение таблицы 2.1

Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор при оптимиза- ции конструкций короткой сети и электрододержателя
3. Потери с боковой по- верхности электрода (зашихтованной и неза- шихтованной)		Косвенно, при изме- нении диаметра элек- трода. В рамках по- ставленной задачи – не рассматривается
4. Потери с воздухом, охлаждающим электрод	Как показывает прак- тика эксплуатации самообжигающихся электродов, обдув электрода воздухом оказывает значитель- ное влияние на режим обжига электрода. Изменение темпера- туры воздуха между электродом и манте- лем (путём изменения расхода или путём изменения температу- ры воздуха) приводит к изменению высоты столба «жидкой мас- сы» над верхней кромкой контактной щеки и некоторому смещению зоны кок- сования. При уменьшении расхода воздуха, столб расплавленной массы повышается, а с уве- личением температуры нагрева уменьшится её вязкость и более тяже- лый компоненты массы	На печах РКО-25 об- дув электродов осуще- ствляется централизо- ванно – см. приложе- ние А, п.3. Воздух на обдувку электродов подается без подогрева, расход регулируется шибером. Необходимые изме- нения в конструкции системы обдува элек- трода определяем по результатам моделиро- вания

ЗАО «Электротерм»



Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор при оптимиза- ции конструкций короткой сети и электрододержателя
	ны образования полу- кокса из связующего. В результате электрод получается расслоен- ным, что вызывает в нем внутренние напря- жения и трещины уса- дочного характера. При интенсивном охлаждении электродов воздухом, электродная масса в верхней части расплавленного столба может «подмерзнуть», что приводит к нару- шению режима коксо- вания и снижает каче-	
	ство электродов.	
1. Токоподвод	Основными элемен- тами, входящими в со- став токоподвода и влияющими на процесс формирования элек- трода, являются: - кольцо нажимное, создающее необходи- мое усилие для прижа- тия контактных щёк к электроду; - контактная щека, пе- редающая ток на элек- трод; - токоподводящие тру- бы, передающие ток от короткой сети на кон- тактную щеку и распо-	Необходимость вне- сения изменений в кон- струкцию элементов обозначенных во вто- ром столбце данной таблицы, определяем по результатам моде- лирования



Фактор, влияющий на процесс нормаль- ного формирования и обжига электрода	Воздействие, ока- зываемое фактором	Воздействие на фак- тор при оптимиза- ции конструкций короткой сети и электрододержателя
	лагающиеся в про-	
	странстве определен-	
	ным образом друг от-	
	носительно друга;	
	- водоохлаждаемые	
	экраны – нижние и оо-	
	ковые.	
	Влияние двух первых	
	элементов токоподвода	
	на процесс формирова-	
	ния электрода рассмат-	
	ривалось в той иди	
	баланса Влияние леух	
	последних элементов -	
	было обозначено при	
	рассмотрении причин	
	ассиметрии теплового	
	поля электрола (см. п/п	
2. Форма ванны	1.2 настояшей записки)	В рамках поставленной
	,	залачи рассматриваем
	Влияние данного	только третью со-
	фактора на процессы	ставляющую этого
	формирования и обжи-	фактора - неравномер-
	га электрода рассмат-	ное распределение тока
	ривалось выше – см.	по элементам токопод-
	п/п 1.2 настоящей за-	вода. Необходимые
	писки	изменения в конструк-
		ции токоподвода опре-
		деляем по результатам
		моделирования

Вывод - Таким образом, задачу достижения наилучших условий коксования электродной массы на печах цеха №4 путём изменения существующей конструкции короткой сети и узла электрододержателя печи РКО-25 необходимо решать шире, чем это обозначено в Задании



# 🧱 ЗАО «Электротерм»

#### 3 Анализ элементов вторичного токоподвода

#### 3.1 Проверка сечения токопроводящих элементов

Целью расчёта является проверка токонесущей способности токопроводящих элементов вторичного токоподвода печей РКО-25. Проверку проведена по плотности тока по формуле

$$j = I/(n \cdot s) \leq [j]$$

где *I* – максимальный ток в проверяемом участке короткой сети, А.

- *n* количество токопроводящих элементов на проверяемом участке; *n* в расчётах берётся исходя из количества элементов на полуфазу;
- s площадь сечения токопроводящего элемента (одного), мм<sup>2</sup>;

Величина тока, протекающего по тому или иному участку, рассчитывается исходя из схемы соединения анализируемого участка с выводами НН трансформатора с допущением равенства сопротивлений токопроводящих элементов на том или ином участке короткой сети. Кроме этого, в расчёт принимается протекание тока не через всю фазу, а только по одной полуфазе, что позволяет экстремализировать распределение тока в проводниках. Тогда, исходя из того, что вторичная сторона трансформатора имеет шесть пар выводов, а схема соединения короткой сети - « $\Delta$  на электродах» - мы имеем на каждом выводе пары ток  $I_i$  равный 1/6  $I_\phi$  или  $I_i \approx 8$  770А (расчётный).

Примечания:

 согласно Приложению А (n.12) максимальный фазный ток (расчётный) І<sub>ф</sub>=52000А, следовательно, максимальный ток электрода (расчётный) І<sub>3</sub>=89960А;

• согласно снимкам протоколов электрического режима работы печи ток электрода I<sub>p</sub> изменяется в пределах 83 000 ... 91 000А, от-

🕎 ЗАО «Электротерм»

куда токи в фазе  $I_{\phi}$  имеют изменение в пределах 47 980...52 600А.

Результаты полученных расчётов сведены в таблицу 3.1, а местоположения рассчитываемых токопроводящих элементов представлены на рисунке 3.1.

Таблица 3.1

Номер участка (со-	<i>n</i> *,	s*,	<i>j</i> *,	[ <i>j</i> ], A/mm <sup>2</sup>	
гласно рис. 3.1).	шт.	MM <sup>2</sup>	$A/MM^2$	Условия, ограни-	
Название участка				чивающие плот-	
				ность тока [14]	
Участок 1 - компен-	24	1960	1,11	[j] = 1,0-1,2;	
саторы				по условиям тепло-	
				вого режима про-	
				водника	
Участок 2 – трубо-	4	1256	5,23	[j] = 2,5 - 3,5;	
шины «жёсткого» па-				по условиям э-	
кета, схема «3+2»**				кономической	
				плотности тока	
Участок 3 – трубо-	6	1256	3,48	[j] = 2,5 - 3,5;	
шины «жёсткого» па-				по условиям э-	
кета, схема «3+3»**				кономической	
				плотности тока	
Участок 4 – токопод-	40	1600	0,82	[j] = 1,0-1,2;	
воды гибкие				по условиям тепло-	
				вого режима про-	
				водника	
Токоподводящие тру-	10	1256	4,19	[j] = 3,5 - 4,5;	
бы токоподводов				по условиям	
				экономической	
				плотности тока	
* - см. формулу 3.1;					
** - обозначение схемы, соответствует рисунку 3.1					

**Вывод** - Величина плотности тока в сечениях токоведущих элементов участка 2 выше рекомендуемой по условиям экономической плотности тока, но ниже допустимой для водоохлаждаемых токопроводящих элементов - [j] ≤ 8-9А/мм<sup>2</sup>.



# 3.2 Расчёт активного и индуктивного сопротивлений вторичного токоподвода

ЗАО «Электротерм»

Данный расчет выполнялся по методике, изложенной в [14]. Размеры элементов конструкции вторичного токоподвода приняты согласно геометрии, представленной на электронной 3-D модели короткой сети - см. рисунок 1, Приложение В (уменьшенная модель короткой сети представлена на рисунке 3.2).





Расчет выполнен по электрической схеме замещения печной уста-

новки, изображенной на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Электрическая схема замещения электропечного контура.

 $R_{BT\Sigma}$ ,  $X_{BT_{\Sigma}}$ - суммарные активное и индуктивное сопротивления вторичного токоподвода, учитывающие участки от компенсаторов до кабельной гирлянды включительно;

R<sub>Э, В</sub>-, X<sub>Э, В</sub> - активное и индуктивное сопротивления, включающие участки трубок электрододержателя, электрод и ванну печи.

Конечные результаты расчета приводятся для электропечного контура, приведенного к эквивалентной «звезде», изображенной на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 - Схема замещения электропечного контура, приведенная к эквивалентной «звезде».

# 📴 ЗАО «Электротерм»

Методика расчёта заключается в том, что для расчётов контур вторичного токоподвода разбивается на ряд последовательно соединенных элементарных участков, сопротивление которых можно рассчитать по известным формулам. Сопротивление всего контура определяется как сумма сопротивлений элементарных участков.

Для расчета весь контур вторичного токоподвода был разбит на участки:

- мост расшихтовки (расшихтовка шинопакета со стороны выводов НН трансформатора);
- шихтованный пакет;
- трубки к неподвижным башмакам (расшихтовка шинопакета со стороны кабельной гирлянды);
- кабельная гирлянда;
- трубки токоподвода;
- электрод и ванна печи.

Шихтованный пакет, трубки к неподвижным башмакам, трубки электрододержателя выполнены в виде трубошин наружным диаметром 50 мм, толщиной стенки 10 мм. Диаметр распада электродов 3900 мм, диаметр электродов 1400 мм, глубина ванны – 2630 мм.

### 3.2.1 Мост расшихтовки

Длина данного участка, равная 2.32 м, и включает длину компенсаторов.

Расчет выполнялся по программе Расчет ВТк, разработанной в среде MS Excel. Она позволяет определять сопротивления отдельных проводников в системе параллельных проводников кругового сечения. В данной программе используется следующая методика:

A) Индуктивное сопротивление проводника определяется по формуле:

$$\mathbf{w} = \boldsymbol{\omega} \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$
,

где *f*- частота питающего напряжения, Гц;

*L* - полная или действующая индуктивность проводника, Гн.
 Б) Полную индуктивность *i* – го проводника элементарного участка рассчитываем по формуле:

$$L_i = L_{co\delta i} + \sum_{j=1}^n a \cdot M_{ij}, \quad (n \neq i),$$

где *L*<sub>собі</sub> - собственная индуктивность *i* – го проводника, Гн;

- *M<sub>ij</sub>* взаимная индуктивность между *i* − м и *j* − м из *n* проводников на элементарном участке, Гн;
- *a*= *cos*φ коэффициент взаимной индуктивности, зависящий от сдвига между векторами токов φ.

В данной методике принято допущение о том, что линейные размеры поперечного сечения малы по сравнению с другими их размерами и взаимными расстояниями. В этом случае расчет взаимоиндукции возможно вести по линиям тока, не учитывая габариты и форму сечений проводников.

Поэтому при расчете собственных и взаимных индуктивностей прямолинейных параллельных проводников для  $\mu = \mu_o$  при низких частот (промышленную частоту для всех металлических участков вторичного токоподвода можно считать низкой) используем общую формулу

$$L_{coo}(M) = \frac{\mu_{o} \cdot l}{2\pi} \left( \ln \frac{l + \sqrt{l^{2} + g^{2}}}{g} - \frac{\sqrt{l^{2} + g^{2}}}{l} + \frac{g}{l} \right), \Gamma_{H}$$

где  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - магнитная проницаемость пустоты, Гн/м;

*l* - длина проводника, м;

g - среднее геометрическое расстояние площади сечения от самого себя (при расчете L<sub>coб</sub>) и между осями сечений проводников (при расчете M), м.
Среднее геометрическое расстояние площади сечения от самого себя для кольцевого сечения определяем по формуле

ЗАО «Электпотепм»

$$\ln g_{1,1} = \ln r_{\scriptscriptstyle H} - \frac{r_{\scriptscriptstyle GH}^4}{\left(r_{\scriptscriptstyle H}^2 - r_{\scriptscriptstyle GH}^2\right)^2} \cdot \ln \frac{r_{\scriptscriptstyle H}}{r_{\scriptscriptstyle GH}} + \frac{1}{4} \cdot \frac{3r_{\scriptscriptstyle GH}^2 - r_{\scriptscriptstyle H}^2}{r_{\scriptscriptstyle H}^2 - r_{\scriptscriptstyle GH}^2}.$$

Активное сопротивление одиночного проводника при переменном токе определяется формулой

$$R = k_{\partial \mathcal{H}} \cdot k_n \cdot k_{\delta} \cdot R_o, \text{ Om},$$

где  $R_o$  - активное сопротивление постоянному току, Ом;

*k*<sub>n</sub> - коэффициент поверхностного эффекта;

 $k_{\delta}$  - коэффициент близости;

 $k_{\partial \mathcal{H}}$  - коэффициент добавочных потерь.

Активное сопротивление проводника постоянному току при отсутствии внешних меняющихся по величине магнитных полей равно

$$R_o = \rho_o \frac{l}{S} [1 + \alpha \cdot (t - t_o)],$$
Ом,

где  $\rho_o$  - удельное сопротивление проводника при температуре начальной  $t_o$ , Ом.м;

- *l* длина проводника, м;
- *S* площадь сечения проводника,  $M^2$ ;
- *α* температурный коэффициент электрического сопротивления материала проводника, 1/°С.

Коэффициент поверхностного эффекта полых проводников круглого сечения, изготовленных из немагнитных материалов, может быть определен по приближенной формуле [14]

$$k_{\rm n} = 1 + 3, 3 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{\delta \cdot S}{d \cdot \rho}\right) \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2,$$

где *d* - наружный диаметр проводника, см;

δ - толщина стенки проводника, см;

S - площадь поперечного сечения трубчатого проводника, см<sup>2</sup>;

ЗАО «Электротерм»

ρ - удельное сопротивление материала проводника, Ом·см;

*f*- частота переменного тока, Гц.

Для каждого *i*-го проводника коэффициент близости определяется как

$$k_{\delta i} = \prod_{j=1}^{n} k_{ij}^{\delta}$$

Каждый частный коэффициент близости определяется по кривым [14], в зависимости от расстояния между сечениями, их формы и размеров, а также от соотношения толщины проводника и глубины проникновения тока в него.

Исходными данными, согласно вышеизложенной методике, являют-ся:

1. Пространственное расположение проводников;

2. Геометрия их сечения;

3. Фаза тока, который несет проводник;

4. Удельное сопротивление проводников;

 Коэффициент, отражающий зависимость сопротивления от температуры;

6. Частота питающего напряжения.

О пространственном расположении дает представление перпендикулярное сечение участка. Для участка «Мост расшихтовки» сечение представлено на рисунке 3.5.

Информацией о фазе тока проводника является номер фазы. Максимально возможное число фаз в электрической цепи равно шести. Им соответствуют номера: A – 1, B – 2, C – 3, X - 4, Y – 5, Z – 6. Эти данные необходимы для определения коэффициентов взаимной индуктивности  $a_{ij}$ .



Рисунок 3.5 - Транспозиция проводников на участке «Мост расшихтовки»

В таблице 3.2 приведен протокол расчета данного участка.

Сопротивление фазы определяется из условия параллельного соединения десяти проводников в двух полуфазах.

## 3.2.2 Шихтованный пакет

Проводники на данном участке выстроены в два вертикальных ряда по 10 трубошин в каждом с «шахматным» способом перешихтовки. По чертежам взяты следующие исходные данные:

- длина крайней фазы 11.73 м;
- длина средней фазы 2.07 м;

Количе	ство пр	оводник	OB		20					
Частога тока, Гц					50					
Удельное сопр. материала проводников					в, Ом*м			1,80E-08		
Рабоча	я темпер	хатура, С	2		50					
Температурный коэффициент, 1/С				0,0047						
Номер проводника	Длинна проводника,м	Внешний радиус,м	Внутренний радиус,м	Шлощадь сечения, <sup>м2</sup>	Номер фазы	Координата Х,м	Координата Ү,м	Действующая индуктивность,Гн	Индуктивное сопротивление,Ом	Активное сопротивление,Ом
1	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,785	0,74	4,70439E-06	1,48E-03	5,25E-(
2	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,545	0,74	4,81674E-06	1,51E-03	5,47E-0
3	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,305	0,74	3,71986E-06	1,17E-03	5,51E4
4	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,785	0,445	5,17465E-06	1,63E-03	5,35E4
5	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,545	0,445	5,66586E-06	1,78E-03	5,83E4
6	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,305	0,445	4,46116E-06	1,40E-03	5,93E4
7	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,545	0,295	5,47867E-06	0,0017212	5,77E-0
8	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,305	0,295	4,38E-06	0,0013745	5,92E-(
9	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,545	0	4,2149E-06	0,0013241	5,34E4
10	2,32	0,025	0,015	-	1	-0,305	0	3,38717E-06	0,0010641	5,48E4
11	2,32	0,025	0,015	-	4	0,305	0,74	3,38717E-06	0,0010641	5,48E-(
12	2,32	0,025	0,015	-	4	0,545	0,74	4,2149E-06	0,0013241	5,34E4
13	2,32	0,025	0,015	-	4	0,305	0,445	4,37519E-06	0,0013745	5,92E-(
14	2,32	0,025	0,015	-	4	0,545	0,445	5,47867E-06	0,0017212	5,77E4
15	2,32	0,025	0,015	-	4	0,305	0,295	4,46116E-06	0,0014015	5,93E4
16	2,32	0,025	0,015	-	4	0,545	0,295	5,66586E-06	0,00178	5,83E4
17	2,32	0,025	0,015	-	4	0,785	0,295	5,17465E-06	0,0016257	5,35E-(
18	2,32	0,025	0,015	-	4	0,305	0	3,71986E-06	0,0011686	5,51E4
19	2,32	0,025	0,015	-	4	0,545	0	4,81674E-06	0,0015132	5,47E-0
20	2,32	0,025	0,015	-	4	0,785	0	4,70439E-06	0,0014779	5,25E-(
		акт	ивное са	против	аление фа	ЗЫ	Rf=	1,11E-05		
		индуктивное сопротивление с				азы	Xf=	2,82E-04		

## расстояние между осями трубошин по горизонтали $\alpha t = 0.144$ м;

расстояние между осями трубошин по вертикали t = 0.11 м.

Для такого варианта перешихтовки проводников в [14] приведена специальная методика расчета индуктивного сопротивления пакета в целом. Она заключается в том, что индуктивное сопротивление пакета трубошин с шахматным вариантом перешихтовки проводников определяется выражением:

$$X = \frac{32 \cdot \pi \cdot l \cdot 10^{-7}}{n^2 \cdot m^2} \cdot \left[\frac{m}{2} \cdot L'_o - \sum_{i=1}^m (-1)^{i+1} \cdot (m-i) \cdot \Phi_{1,i+1}\right],$$

где *n* количество вертикальных рядов;

> *m* количество горизонтальных рядов;

$$\dot{L_o} = \frac{n}{2} \cdot \ln \frac{t}{g_{1,1}} + \sum_{i=1}^m (-1)^{i+1} \cdot (n-i) \cdot \ln i;$$

 $\Phi_{l,i+1}$  – табулированная функция, приведенная в [14, табл. 5.14, стр.205], зависящая от n и  $\alpha$ . Обработка этой функции в требуемом диапазоне по методу наименьших квадратов позволила получить аналитическую зависимость, удобную для применения:

$$\Phi_{1,2} = 0,2125 \cdot n^{0,7128} \cdot \alpha^{-1,401}$$
.

Использование данной методики для данного шихтованного пакета дало следующие результаты:

- индуктивное сопротивление крайней фазы равно 0.175 мОм;
- индуктивное сопротивление средней фазы равно 0.031 мОм. Активное сопротивление рассчитывалось по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot \left( 1 + \alpha \left( t_p - t_o \right) \right) \cdot k_n \cdot k_{\vec{o}} \cdot k_{\partial \mathcal{H}} \cdot k_{\partial \mathcal{H}} \text{, Om}$$

удельное сопротивление меди,  $\rho = 1.8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; где р-

площадь сечения проводника м<sup>2</sup>; *S* -

$$S = \frac{\pi}{4} \left[ d^2 - (d - 2 \cdot \delta)^2 \right] = \frac{\pi}{4} \left[ 5^2 - (5 - 2 \cdot 5)^2 \right] = 12.56 \, cm^2 = 0.001256 \, m^2$$

температурный коэффициент сопротивления,  $\alpha = 0.0047$  1/К; α-

> ЗАО «Электротерм» 41

ЗАО «Электротерм»

*t<sub>o</sub>*, *t<sub>p</sub>* - стандартная и рабочая температуры , 20°С и 50°С соответственно;

ЗАО «Электпотепм»

 $k_n$  - коэффициент поверхностного эффекта, для данного сечения  $k_n = 1.06;$ 

 $k_{\delta}$  - коэффициент близости, на данном участке,  $k_{\delta} = 1,06$ ;

 $k_{\partial H}$  - коэффициент внешнего поверхностного эффекта,  $k_{\partial H} = 1,05$ ;

 $k_{\partial \mathcal{H}}$  - коэффициент, учитывающий влияние близлежащих металлоконструкций,  $k_{\partial \mathcal{H}} = 1,15$ .

Сопротивление участка в целом учитывает параллельное соединение 10 проводников в двух ветвях (прямой и обратной).

В результате имеем:

- активное сопротивление крайней фазы  $R_{\kappa,\phi} = 0.0104$  мОм;
- активное сопротивление средней фазы  $R_{c.\phi} = 1.8$  мкОм.

## 3.2.3 Трубки к неподвижным башмакам

Длина этого участка 0,69 м. Проводники на участке выстроены в два вертикальных ряда, в одном прямая, в другом обратная фаза. Расстояние между осями трубошин по горизонтали равно 0.2 м. Расстояние между осями трубошин по вертикали равно 0.68 м.

Расчет выполнен по программе *Расчет ВТк*. В таблице 3.3 представлен протокол расчета данного участка.

## 3.2.4 Кабельная гирлянда

Кабельная гирлянда представляет собой набор гибких лент шириной 0.1 м, толщиной 0.0185 м. В каждой полуфазе по два вертикальных ряда. Расстояние между осями полуфаз 0.68 м. Расстояние между осями рядов в каждой полуфазе 0.22 м, расстояние между осями проводников по вертикали чередуются 0.053 / 0.077 м. Всего проводников в вертикальном ряду 20.

# Таблица 3.3 - Протокол расчета сопротивлений участка «Трубки к неподвижным башмакам»

进 ЗАО «Электротерм»

Частота тока, Гц					50					
Удельное сопр. материала проводников, (					Эм*м			1,80E-08		
Рабочая температура, С					100					
Температурный коэффициент, 1/С					0,0042					
ДНИКА	цника,м	циус,м	адиус,м	. НИЯ, М <sup>2</sup>	3 <b>b</b> I	т, Х, м	т, Ү, м	щая сть,Гн	ное ие,Ом	е ие,Ом
о прово	прово	ний ра,	нний р	дь сече	мер фа	дината	дината	іствую стивно(	дуктив тивлен	. КТИВН ( ТИВЛ СН
Home	Длинна	Внеш	Внутре	Площа	Нс	Kool	Kool	Дей индун	Ин сопро	А сопро
1	0,69	0,025	0,015	-	1	0	0	5,70161E-07	1,79E-04	1,78E-05
2	0,69	0,025	0,015	-	1	0	0,2	6,71244E-07	2,11E-04	1,87E-05
3	0,69	0,025	0,015	-	1	0	0,4	7,1354E-07	2,24E-04	1,91E-05
4	0,69	0,025	0,015	-	1	0	0,6	7,32827E-07	2,30E-04	1,93E-05
5	0,69	0,025	0,015	-	1	0	0,8	7,40556E-07	2,33E-04	1,95E-05
6	0,69	0,025	0,015	-	1	0	1	7,40556E-07	2,33E-04	1,95E-05
7	0,69	0,025	0,015	-	1	0	1,2	7,32827E-07	0,0002302	1,93E-05
8	0,69	0,025	0,015	-	1	0	1,4	7,14E-07	0,0002242	1,91E-05
9	0,69	0,025	0,015	-	1	0	1,6	6,71244E-07	0,0002109	1,87E-05
10	0,69	0,025	0,015	-	1	0	1,8	5,70161E-07	0,0001791	1,78E-05
11	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	0	5,70161E-07	0,0001791	1,78E-05
12	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	0,2	6,71244E-07	0,0002109	1,87E-05
13	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	0,4	7,1354E-07	0,0002242	1,91E-05
14	0,69	0,025	0,015	•	4	0,68	0,6	7,32827E-07	0,0002302	1,93E-05
15	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	0,8	7,40556E-07	0,0002327	1,95E-05
16	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	1	7,40556E-07	0,0002327	1,95E-05
17	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	1,2	7,32827E-07	0,0002302	1,93E-05
18	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	1,4	7,1354E-07	0,0002242	1,91E-05
19	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	1,6	6,71244E-07	0,0002109	1,87E-05
20	0,69	0,025	0,015	-	4	0,68	1,8	5,70161E-07	0,0001791	1,78E-05
	активное сопротивление Rf= 1,89E-06 индуктивное сопротивление Xf= 2,13E-05									
ЗАО «Электротерм» 4										

Расчет индуктивного сопротивления проводим по формуле

$$X=2\pi f \cdot 2(L_{11}-M_{12}),$$

где *L*<sub>11</sub>- собственная индуктивность пакета лент с токами одного направления;

*M*<sub>12</sub>- взаимная индуктивность между пакетами лент с токами противоположного направления.

Взаимная индуктивность между пакетами лент определяется по формуле

$$M(L) = l \cdot F \cdot 10^{-9},$$

где *l* - длина участка;

*F=f(g/l, φ)* - табулированная функция, приведенная в [14, табл 5.6, стр.181];

*g* - среднегеометрическое площади сечения от самого себя, или расстояние между осями сечений;

 $\varphi$  - угол гиба проводников равен 180°.

Среднегеометрическое площади прямоугольника от самого себя определяется формулой

$$g=0.2236(b+c),$$

где *b* и *c* – габариты сечения, см.

В нашем случае l = 220 см; b = 32 см; c = 132 см,  $g_{12}=68$  см. Тогда  $g_{11}=0.2236\cdot(32+132)=36.7$  см, откуда  $g_{11}/l=36.7/220=0.1667$ . По таблице [14]  $F(0.1667; \pi)=2.19$ , значит  $L=2.19\cdot220\cdot10^{-9}$  Гн.

Для определения М:

Из [14, табл. 5.4, стр. 174]  $g_{12}/c = f(t/c) = f(68/132) = f(0,511) = 0.627;$  $g_{12}/l = 0.627 \cdot c/l = 0.627 \cdot 132/220 = 0.376;$  F(0,376; $\pi$ ) = 1.078.

 $M = 1.078 \cdot 220 \cdot 10^{-9}$  Гн.

В результате

*X*=2π·50·2(2.19-1.078) 220·10<sup>-9</sup>=0.153 мОм.

«Электротерм»

# 📴 ЗАО «Электротерм»

Для расчета активного сопротивления кабельной гирлянды была создана двумерная модель участка, в среде ANSYS, и было определено активное сопротивление на единицу длины системы проводников – 0.00146 мОм/м. Полное сопротивление кабельной гирлянды составило 6.45 мкОм.

## 3.2.5 Трубки электрододержателя

Исходными данными для расчета сопротивлений трубок электрододержателя являются:

- длина трубок (расстояние от токоподводящего кольца до середины контактных плит) *l<sub>mp</sub>* = 290 см;
- количество трубок *n* = 20;
- диаметр распада электродов  $D_p = 390$  см;
- диаметр электрода  $D_9 = 140$  см.

Для расчета индуктивного сопротивления трубок электрододержателя в [14] предлагается следующая формула:

$$X_{m\mathfrak{I}} = X_{c} + \Delta X \cdot K_{c} + X_{M} + X_{H}, \text{ MOM}$$

где X<sub>c</sub> - реактивное сопротивление, определяющееся собственной индуктивностью трубок;

- $\Delta X \cdot K_c$  «поправка на изоляцию», учитывающая расстояние между трубками; определяется по [14, табл. 5.17, стр. 210],  $\Delta X = f(D_{3}, l_{mp}) = f(1400$ мм, 2900мм)=0.0136,  $K_c = f(D_{3}, n) = f(1400$ мм, 20)=0.68;
- *X<sub>м</sub>* реактивное сопротивление, определяющееся взаимной индуктивностью трубок электрододержателя своей фазы с трубками соседних фаз;
- *X<sub>н</sub>* реактивное сопротивление, определяющееся взаимной индуктивностью трубок электрододержателя с электродами.

*X<sub>c</sub>*, *X<sub>м</sub>*, *X<sub>н</sub>*- определяются по графикам [14, рис. V.17, стр. 212]:

-  $X_c = f(D_3, l_{mp}) = f(1400 \text{ MM}, 2900 \text{ MM}) = 0.22 \cdot 10^{-3}$ 

🛄: ЗАО «Электротерм»

- $X_{M} = f(D_{p}, l_{mp}) = f(3900 \text{ MM}, \overline{2900} \text{ MM}) = -0.07 \cdot 10^{-3}$
- $X_{\mu} = f(D_p \text{ , } l_{mp}) = f(3900 \text{ MM}, 2900 \text{ MM}) = -0.075 \cdot 10^{-3}$

В результате индуктивное сопротивление трубок электрододержателя равно 0.232мОм.

Активное сопротивление трубок электрододержателя рассчитано по формуле (14), при  $\alpha = 0.0047$  1/K;  $t_p$ ,  $t_o = 20^{\circ}$ C и 50°C соответственно;  $k_n = 1.06$ ;  $k_{\delta} = 1.06$ ;  $k_{\partial h} = 1.2$ ;  $k_{\partial \infty} = 1.2$ . и с учетом параллельного соединения 20 трубок составляет 0.0038 мОм.

## 3.2.6 Электрод и ванна

При расчете индуктивного сопротивления ванны и электродов приняты следующие исходные данные:

- расстояние от середины контактных плит до подины *H*=370 см;
- диаметр распада электродов  $D_p = 390$  см,
- диаметр электрода  $D_{9} = 140$  см.

Для трехэлектродной круглой ванны индуктивное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot K_1,$$

где L - значение индуктивности при  $D_p / D_3$ , L = 2.6;

 $K_{l}$  - поправочный коэффициент для других отношений  $D_{p}/D_{3}$ .

L и K<sub>1</sub> определяются по графикам [14, рис. V.18, стр. 215]:

- 
$$L = f(D_{2} H/D_{p}) = f(1400 \text{ MM}, 3700/3900) = 1120 \cdot 10^{-9} \Gamma$$

- 
$$K_1 = f(D_p / D_3) = 1.2$$

Таким образом, индуктивное сопротивление этого участка равно

$$X=2\cdot\pi\cdot50\cdot1120\cdot10^{-9}\cdot1.2=0,422$$
 MOM.

Активное сопротивление электрода с учетом коэффициента добавочных потерь  $k_o$ , учитывающего неравномерность распределения тока по сечению электродов трехэлектродной печи, равно

$$R = k_{\partial} \cdot R_{\vartheta} = k_{\partial} \cdot \frac{\rho_{\vartheta} \cdot l}{S} \,.$$

# 📴 ЗАО «Электротерм»

Длина электрода, на которой имеют место потери энергии равна, сумме длины электрода от середины контактных щек до колошника и длины электрода ниже колошника, на которой происходит потеря энергии (≈ 0.5 м). Таким образом длина электрода в данном расчета принята равной 1.2 м.

Удельное сопротивление самообжигающегося электрода принято равным 60·10<sup>-4</sup> Ом·см.

Для нахождения коэффициента  $k_{\partial}$  необходимо знать отношение диаметров  $D_{P,\partial} / d_{\partial} = 390/140 = 2.78$  и рассчитать величину

$$\frac{D_{\Im}}{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}} = \frac{140}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}}{60 \cdot 10^{-4}}} = 1.79$$

по графикам [14, рис. VI.2, стр. 242] k<sub>0</sub> равно 1.1.

Таким образом, активное сопротивление электрода получилось равным 0.0504 мОм.

## 3.2.7 Контактное сопротивление

На основании анализа большого числа руднотермических печей в [14] рекомендуется принимать среднюю величину контактного сопротивления контактных щёк с самообжигающимся электродом на уровне  $R_{\kappa n} = (0.2 - 0.25)$  мОм при давлении 0,15 МПа. Учитывая, что на мощных печах устанавливают несколько контактных плит  $(n_1)$  на одном электроде, в расчетах общее сопротивление контакта «плита - электрод» может быть принято равным

$$R_{\kappa u} = 0.25/n_1 = 0.25/20 = 0.0125$$
 MOM,

## 3.2.8 Результаты расчётов.

Результаты расчета индуктивного сопротивления крайней фазы сведены в таблицу 3.4. Результаты расчета активного сопротивления крайней фазы сведены в таблицу 3.5.



Таблица 3.4 - Результаты расчета индуктивного сопротивления крайней фазы.

Участок	Индуктивное сопротивление, мОм	Индуктивное со- противление, при- веденное к звезде, мОм	%
Мост расшихтовки	0,282	0,094	10,7
Шихтованный пакет	0,175	0,0583	6,6
Трубки к неподвиж-	0,0426	0,0142	1,6
ным башмакам			
Кабельная гирлянда	0,153	0,051	5,8
Трубки электродо-	0,234	0,234	26,8
держателя			
Электрод и ванна пе-		0,422	48,5
ЧИ			
Итого		0,8735	100

Таблица 3.5 - Результаты расчета активного сопротивления крайней фазы.

Участок	Активное со- противление, мОм	Активное сопро- тивление, приве- денное к звезде, мОм	%
Мост расшихтовки	0.0111	0.0037	4.8
Шихтованный пакет	0.0104	0.00346	4.5
Трубки к неподвиж-	0.00378	0.00126	1.6
ным башмакам			
Кабельная гирлянда	0.00645	0.00215	2.8
Трубки электродо-	0.0038	0.0038	4.9
держателя			
Электрод		0.0504	65.2
Контактные щеки		0.0125	16.2
Итого		0.0773	100

В средней фазе индуктивное сопротивление будет на  $(X_{\kappa p,uun} - X_{cp,uun})/3 = (0.175 - 0.031)/3 = 0.048$  мОм меньше.  $X_{cp} = 0.8255$  мОм. Активное сопротивление будет на  $(R_{\kappa p,uun} - R_{cp,uun})/3 = (0.0104 - 0.0018)/3 = 0.0029$  мОм меньше.  $R_{cp} = 0.0744$  мОм.

# 🖳 ЗАО «Электротерм»

## 3.3 Проверка компенсатора нажимного

В соответствие с п.3 перечисления А таблицы 2.1 контактная щека должна прижиматься к электроду с давлением 0,098 – 0,196 МПа. Контактная площадь щеки печей РКО-25 равна 0,367м<sup>2</sup>, следовательно, щека должна прижиматься к электроду с усилием не менее 36000 – 72000Н. Прижим контактных щёк к электроду на печах РКО-25 осуществляется гидравлическими нажимными компенсаторами. Конструкция типового компенсатора нажимного представлена на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Конструкция типового нажимного компенсатора

Усилие, развиваемое нажимным компенсатором в зависимости от давления рабочей жидкости, рассчитывалось по формуле

$$F = p \times S - (G + F_{np})$$

где *р* - давление рабочей жидкости, МПа;

- *S* рабочая площадь, рассчитанная по внутреннему диаметру гофры, м<sup>2</sup>;
- G жесткость волнистого сильфона, для волнистого сильфона с толщиной стенки 1 мм G = 392 Н/мм;
- *F<sub>np</sub>* усилие развиваемое механизмом возврата при сжатии пружины, H.

Расчёты сделаны для p = 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 1.4; 1.6 МПа . Результаты расчётов представлены в виде графиков - см. рисунки 3.7.

ЗАО «Электротерм» 49



Рисунок 3.7 – График зависимости усилия, развиваемого нажимным компенсатором, от давления рабочей жидкости.

Заштрихованным показана зона, где контактная щёка прижимается к электроду с усилием 0,1 – 0,2 МПа.

**Вывод** – с учётом того, что предварительный холостой ход компенсатора до упора в контактную щеку, как правило, составляет порядка 10 мм можно говорить о том, что усилие, необходимое для прижатия контактной щеки к поверхности электрода, развивается компенсатором в диапазоне давлений рабочей жидкости от 0,95 МПа до 1,3 МПа. При этом необходимо отметить, что усилие, развиваемое компенсатором при определённом давлении рабочей жидкости, с увеличением хода снижается.

# 📴 ЗАО «Электротерм»

# 3.4 Анализ контактной щеки и бокового экрана

Расчёт контактной щеки и боковых экранов отдельно не рассматривается и проводится в комплексе с расчётом теплового поля электрода, представленного в разделе 7 настоящей записки.

# 🥮 ЗАО «Электротерм»

#### 4 Расчёт диаметра электрода и рабочих параметров печи

#### 4.1 Расчёт диаметра электрода d<sub>э</sub>, исходя из мощности печи S

Согласно принципиальной схеме электрических соединений электропечь РКО-25 запитывается от трёх однофазных трансформаторов мощностью 9200 кВА каждый. К трансформаторам подключаются УПК, обеспечивающие возможность компенсации реактивной мощности до  $cos \ \varphi = 0.92$ .

Тогда максимальную возможную активную мощность печной установки имеем равной

$$P_{a\kappa m} = 3 \cdot 9200 \cdot 0,92 = 25392 \kappa Bm.$$

Все имеющиеся на сегодняшний день схемы расчета РВП в той или иной мере используют метод подобия, основанный на расчёте «проектируемой» печи по подобию «аналоговой» печи, имеющей хорошие показатели работы. В нашей ситуации «аналога» нет, поэтому расчёт диаметра электрода выполняем по допустимому значению плотности тока *j* в электроде.

Расчёт начинаем с определения электрических параметров печи. Согласно формулам 1, 2 [15, стр. 4], полученных методом математической статистики показателей электрического режима более 90 ферросплавных печей:

а) связь между силой тока в электроде  $I_{2}$  и активной мощностью печи  $P_{a\kappa m}$  (MBt) описывается уравнением

$$I_{\mathfrak{I}} = m \cdot P_{a\kappa m}^{0,72}, \ \kappa A \tag{4.1}$$

где m - коэффициент характеризующий сплав, для ферросиликохрома  $\Phi$ CX48 m = 8,74.

б) связь между активной составляющей напряжения на электроде  $U_3$ и силой тока в электроде  $I_3$  (A) описывается уравнением

$$U_{3} = m_{1} \cdot I_{3} {}^{0,5}, B$$
 (4.2)

где  $m_1$  - коэффициент характеризующий сплав, для ферросиликохрома  $\Phi$ CX48  $m_1 = 0,291$ .

Подставляя числовые значения величин в соответствующие формулы, имеем:

- 
$$I_{9} = 8,74 \cdot 25,392^{0,72} = 89,72 \ (\kappa A),$$

$$U_{9} = 0,291 \cdot 89720^{0,5} = 87,16 \text{ (B)}.$$

Рассчитаем линейное напряжение печного трансформатора

$$U_{2n} = \frac{U_{2n}\sqrt{3}}{\cos\varphi\eta_{2}} \tag{4.3}$$

ЗАЛ «Эпектпотен

где η<sub>Э</sub> - электрический к.п.д. участка вторичного токоподвода от выводов НН трансформатора до участка электрода, погруженного в ванну. Численное значение η<sub>Э</sub> находим по формуле

$$\eta_{\mathcal{F}} = R_{\mathfrak{s}} / (R_{\mathfrak{s}} + r_{\mathfrak{s}.m}) \tag{4.4}$$

где *R<sub>s</sub>* - активное сопротивление ванны печи. *R<sub>s</sub>* определяется по формуле

$$R_{\rm g} = U_{\rm g} / I_{\rm g}.$$

Напряжение на электроде *U*<sub>3</sub> и силу тока в электроде *I*<sub>3</sub> берём из предоставленных снимков протоколов электрического режима печи №44 - см. Приложение А. Результаты расчёта представлены в виде таблицы 4.1;

*r*<sub>6.m</sub> - активного сопротивления участка вторичного токоподвода от выводов НН печного трансформатора до участка электрода, погруженного в ванну. Величину активного сопротивления берём из таблицы 3.5; *r*<sub>6.m</sub> = 0,07633 мОм.

 $\cos \varphi = 0.92.$ 

Примечание — с целью упрощения расчётов, в расчёт взяты средние значения параметров  $R_6$  и  $r_{6.m}$ .

Таблица 4.1

						RAO «3)	пектро	otepm>
Фаза	Напряжение на электроде U <sub>2</sub> , В							
Α	96,6	94,65	94,75	97,15	98,30	97,3	98,00	98,15
В	96,35	97,75	97,00	97,95	97,4	97,25	97,05	97,4
С	101,75	102,25	103,1	101,45	100,95	101,30	100,80	100,5
	Ток электрода І, кА							
A	84,79	84,55	84,54	84,74	84,90	84,51	84,37	84,95
B	86,51	84,07	84,41	85,65	88,03	85,36	85,61	86,17
С	84,09	84,70	83,86	83,55	86,56	83,72	83,64	84,52
	Активное сопротивление ванны R <sub>e</sub> , мОм ·м							
A	1,14	1,12	1,12	1,146	1,158	1,151	1,162	1.155
В	1,11	1,16	1,15	1,144	1,106	1,139	1,134	1,13
С	1,278	1,207	1,232	1,22	1,166	1,21	1,205	1,189
	$R_{g}=1.16 \text{ MOM} \cdot \text{M}$							

Примечание – как видно из снимков протоколов печь работает на режиме «Равных или близких к равным токах». Такой режим на печах с асимметрией вторичного токоподвода осуществляется регулированием напряжения трансформаторов на отдельных фазах. С учётом принятого условия усреднения параметров фаз, активное сопротивление ванны  $R_6 = 1/3(R_{6A} + R_{6B} + R_{6C})$ .

Подставляя числовые значения  $R_{e} u r_{e.m}$  в формулу (4.4) получаем  $\eta_{\mathcal{P}} \approx 0.938$ .

Тогда *U*<sub>2л</sub> ≈ 174,7 В.

Рассчитываем максимальную и среднюю ступени напряжения печного трансформатора с сохранением постоянства мощности

$$U_{2n \max} = 1, 1 \ U_{2n} \tag{4.5}$$

$$U_{2n. cped} = 0.9 \ U_{2n} \tag{4.6}$$

или  $U_{2\pi cped} = 157$  В и  $U_{2\pi max} = 192$  В соответственно.

Для определения диаметра электрода рассчитаем максимальный ток электрода

$$I_{2\max} = \frac{S}{U_{2\pi,cped}\sqrt{3}}$$
(4.7)

или *I*<sub>2max</sub> = 101,6 кА.

Зная величину рекомендуемого значения плотности тока в элек - троде для того или иного сплава, площадь сечения электрода  $S_3$  можно определить по формуле

# $S_{2} = I_{2}/j_{2}$ 3АО «Электротерм» (4.8)

Тогда, диаметр электрода  $d_{3}$  определяем по формуле

$$d_{9} = (4 S_{9} / \pi)^{0.5}$$
(4.9)

Примечания:

1. Согласно рекомендаций в [16, 17, 18] допустимое значение плотности тока  $j_3$  в электроде при выплавки ферросиликохрома следует принимать около 7 – 7,1  $A/cm^2$ . Данные рекомендации по плотности тока даны с учётом того, что электрод рассматривается не только как проводник тока, но и как элемент ванны.

2. Некоторые исследователи рекомендуемые значения плотности тока в электроде при выплавки ферросиликохрома указываются в пределах 6 – 7 А/см<sup>2</sup> [18, 19].

Подставляя числовые значения величин в формулы (4.8) и (4.9) получим  $d_3 = 1350$  мм. Проверим электрод по плотности тока на рабочих режимах- $j_3 \approx 6,3$  A/см<sup>2</sup>.

**Вывод** – На действующих печах РКО-25 используются электроды завышенного диаметра. Для введения в печь максимальной мощности, соответствующей  $cos \ \varphi = 0,92$ , необходимы электроды меньшего диаметра. Кроме этого характеристики установленных трансформаторов в основном не соответствуют требуемым электрическим параметрам печи. Исключение составляют 4-8 ступени напряжения, которые позволят работать на электродах меньшего диаметра.

При диаметре электрода *d*<sub>э</sub> = 1350 мм геометрические параметры печи, согласно рекомендациям [10], должны быть:

- диаметр распада электрода  $D_{p.3} = d_3 \times 2,236 \ S^{0,049}$  (4.10) или  $d_3 = 3,55$ м;
- диаметр ванны печи  $D_e = d_3 \times 3,717 S^{0,125}$  (4.11) или  $D_e = 7,6$ м;

высота ванны печи  $H_e = d_3 \times (1, 8 - 2) S^{0,033}$  ЗАО «Электротерм» (4.15) или  $H_e = 2,71 - 3,01$ м.

Примечание – Следует отметить, что использование печей РКО-25 с электродами  $d_9 = 1400$ мм (с установленной мощностью трансформаторов 27600кВА) для выплавки ферросилиция марок ФС65 и ФС75 хорошо подтверждается рекомендациями [25], согласно которым зависимость диаметра электрода  $d_9$  (мм) от активной мощности печи  $P_{aкm}$  (MBm) при выплавке ферросилиция определяется формулой

$$d_9 = 483, 4 \times P_{a\kappa m}^{0,3257}$$

или, после подстановки числового значения величины  $P_{akm}$ ,  $d_3 = 1386$ мм. Округление полученный диаметр электрода до ближайшего диаметра из рекомендованного ряда даёт  $d_3 = 1400$ мм.

# 4.2 Расчёта рабочих электрических параметров печи по методике, предложенной в [19]

Данный расчёт выполнен для проверки результатов, полученных в п/п.4.1. Согласно методике, предложенной в [19], средний ток, который необходимо иметь в электроде для обеспечения нормального ведения технологического процесса при наличии продольно-емкостной компенсации реактивной мощности, можно определить по формуле

$$I_{cp} = \left\{ \frac{\frac{P_c}{3}}{(1-2n)r} + \frac{c^2 \left(\frac{P_c}{3}\right)^{2n}}{2(1-n)(1-2n)r^2} - \sqrt{\left[\frac{\frac{P_c}{3}}{(1-2n)r} - \frac{c^2 \left(\frac{P_c}{3}\right)^{2n}}{2(1-n)(1-2n)r^2}\right]^2 - \frac{\frac{P_c}{3}}{(1-n)(1-2n)r^2}} \right\}^2$$

где  $P_c$  - средняя мощность потребляемая из сети электропечной установкой,  $P_c$ =25392 кВт;

*с* и *n*- постоянные коэффициенты, определяемые по [19, таблица 6-2, с 171]. Для ферросиликохрома *с*=0,48 В/(Вт)<sup>0,33</sup>, *n*=0,33;

*r* - активное сопротивление фазы короткой сети. Величину активного сопротивления участка вторичного токоподвода *r* от выводов НН трансформатора до участка электрода, погруженного в ванну, берём из таблицы 3.5.

r = 0,07633 мОм (в расчёт берём среднее значение  $r_{e.m}$ )

3 - количество электродов печи.

Подставляя числовые значения величин, находим, что  $I_{\rm cp} \approx$  89383А.

Зная средний ток в электроде, можно найти среднее фазное напряжение холостого хода трансформаторного агрегата  $U_{\phi.cp} = S/(3I_{cp})$  или  $U_{\phi.cp} \approx 103$  В. Линейное напряжение печного трансформатора  $U_{n.cp}$  определяем, как  $U_{\phi.cp} \times \sqrt{3}$ , откуда  $U_{n.cp} \approx 178,2$  В. При этом, диапазон постоянной мощности выбирается также, как и на печах работающих без УПК, т.е. этот диапазон должен включать в себя рабочие напряжения равные  $U_{n.cp} \pm 10\%$ .

**Вывод** - Сравнивая полученные данные по *I* <sub>ср</sub> и *U*<sub>л..ср</sub> с результатами расчётов п/п 4.1, можно отметить достаточную сходимость результатов, полученных различными методами расчёта.

# 4.3 Расчёт электрических и геометрических параметров печи без использования УПК

Расчёт параметров печи выполняем по формулам (4.1) и (4.2), исходя из условий:

1) использование существующих печных трансформаторов без подключения УПК;

2) использование существующей короткой сети;

3) использование конструктивного исполнения существующего токоподвода;

4) усреднение параметров R и X фаз вторичного токоподвода;

5) принятие в расчёте существующих  $\cos \varphi$  и  $\eta_{\Im}$  печи.

ЗАО «Электротерм» 57

«Электпотелм»

Для определения тока в электроде  $I_3$  предварительно определим естественный *cos*  $\varphi$  печи, который рассчитываем по формуле

$$\cos\phi = \frac{R_n}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}}$$
(4.16)

О «Эпектпотер

где  $R_n$  - активное сопротивление печи.  $R_n$  находится как сумма

 $R_n = R_{e} + r_{e.m}$ .  $R_n = 1,23633$  MOM;

 $X_n$  - индуктивное сопротивления печи. Величину индуктивного сопротивления  $X_n$  берём из таблицы 3.4;  $X_n = 0,8735$  мОм.

Подставив численные значения в формулу (4.16), находим, что естественный  $\cos \varphi$  печи приблизительно равен 0,8. Тогда по формуле (4.1) находим рабочий ток в электроде

 $I_{9} = 8,74 \cdot (27,6 \times 0,8)^{0,72} = 81,13$  кА.

Откуда по формуле (4.2) - напряжение на электроде

 $U_9 = 0,291 \cdot 81130^{0,5} = 82,9 \text{ B}$ 

По формуле (4.3) рассчитаем линейное напряжение печного трансформатора -  $U_{2\pi} \approx 191$  В.

Тогда максимальная и средняя ступени напряжения печного трансформатора с сохранением постоянства мощности:

- 
$$U_{2\pi max} = 210 \text{ B}$$

- 
$$U_{2\pi \, cped} = 172 \, \mathrm{B}$$

Определяем максимальный ток электрода,  $I_{2max} = 92,75$  кА.

Откуда, диаметр электрода  $d_3 = 1300$ мм (по формулам (4.8) и (4.9)). Полученный диаметр электрода проверим по допустимой плотности тока на рабочих токах -  $j_2 \approx 6,11$  A/см<sup>2</sup>.

Расчёт геометрических параметров печи производим согласно рекомендациям [10]:

- диаметр распада электрода  $D_{p,3} = d_3 \times 2,236 S^{0,049}$  или  $d_3 = 3,45$ м;
- диаметр ванны печи  $D_e = d_3 \times 3,717 S^{0,125}$  или  $D_e = 7,37 m;$
- высота ванны печи  $H_e = d_9 \times (1, 8 2) S^{0,033}$  или  $H_e = 2,63 2,92$ м.

# 4.4 Расчёт электрических и геометрических параметров печи, исходя из диаметра электрода и *cos φ* = 0,92

🖳 ЗАО «Электротерм»

Задачу решаем для диаметра электрода Dэ=1400мм методом от обратного:

1) исходя из рекомендуемой плотности тока, определяем максимальный ток в электроде

$$I_{2max} = 7 \times (\pi \cdot 140^2)/4 = 107,7$$
кA

2) решая совместно уравнения (4.1), (4.2), (4.3), (4.6), получим требуемую активную мощность печи  $P_{a\kappa m} = 27,6$  МВт. Тогда мощность трансформаторов S = 27,6/0,92 или  $S \approx 30$ МВА.

3) по формуле (4.1) находим рабочий ток в электроде

$$I_{9} = 8,74 \times (30 \times 0.92)^{0.72} = 95,27 \text{ KA} \ (j_{9} \approx 6,19 \text{ A/cm}^{2})$$

по формуле (4.2) определяем напряжение на электроде

 $U_{2} = 0,291 \times 95270^{0,5} = 89,8 \text{ B}$ 

4) по формуле (4.3) рассчитаем линейное напряжение печного трансформатора -  $U_{2n} \approx 180$  В.

Тогда максимальная и средняя ступени напряжения печного трансформатора с сохранением постоянства мощности:

- 
$$U_{2\pi max} = 198B$$

-  $U_{2\pi cped} = 162 \text{ B}$ 

5) определяем геометрические параметры печи:

- диаметр распада электрода  $D_{p_3} = 1400 \times 2,236 \times 30^{0,049} = 3,7$ м;
- диаметр ванны  $D_e = 1400 \times 3,717 \times 30^{0,125} = 7,96$  м
- высота ванны  $H_e = 1400 \times (1,8-2) \times 30^{0,033} = 2,82 3,13$  м.

# 4.5 Расчёт электрических и геометрических параметров печи, исходя из диаметра электрода и естественного *cos φ*

Задачу решаем для диаметра электрода Dэ=1400мм и естественного *cos*  $\varphi$  = 0,8. Расчёт аналогичен расчётам, проведённым в п/п 4.1 и 4.2; за основу в расчёте взята активная мощность печи  $P_{a\kappa m} = 27,6$  МВт, ко-

🕑 ЗАО «Электротерм»

торую печь потребляет независимо от *cos*  $\varphi$  печи установки. Результаты

расчёта представлены в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2

Параметр	Числовое
	значение
S, MBA	34,4
I <sub>э</sub> ,кА	95,27
$U_{2}$ , $B$	89,8
$U_{2\pi}$ , $B$	207
$U_{2\pimax}$ , $B$	227
$U_{2\picpe\partial}$ , $B$	186
$I_{2max}$ , $\kappa A$	106,9
$D_{p \mathfrak{I}}$ , $\mathcal{M}$	3,7
$D_{g}$ , $\mathcal{M}$	7,96
Н <sub>в</sub> ,м	2,82 - 3,13

# 🧓 ЗАО «Электротерм»

#### 5 Расчёт аэродинамики системы обдува электрода

Расчёт аэродинамики производился по числовым моделям. В начале расчёта, на базе исходной 3-D модели (Приложение В, см. рисунок 1), была построена исходная числовая модель, соответствующая 3-D модели вида, представленного на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 - Исходная САD – геометрия, использованная для построения числовой модели

В ходе расчета определялись следующие параметры:

давление или скорость воздушного потока в точках стыковки цеховых воздуховодов к траверсе – точки 1,2,3 (см. рисунок 5.1);

- давление или скорость воздушного потока в месте нижнего обреза мантеля – существующее положение мантеля (см. рисунок 5.2 – плоскость 4);
- давление или скорость воздушного потока в плоскости 5, которая представляет собой новое положение мантеля и расположена на 400 мм выше контактных щёк (см. рисунок 5.2);
- распределение вектора скорости воздушного потока существующего в объёме V<sub>A</sub> для мантеля штатной длины и удлиненного варианта мантеля. Под объёмом V<sub>A</sub> следует понимать объём внутреннего пространства токоввода.



Рисунок 5.2 - Пояснения к положению нижнего торца мантеля.

Характеристики вентиляторов, подключаемых к коллектору воздуховода, и расход воздуха на обдув электрода по фазам приведены в п.3.3 и п.3.4 Приложения А.

О «Электпотепм»



#### 5.1 Математическая модель задачи

Для моделирования задачи в математическом поле была создана математическая модель, которая ввиду симметрии пространства трехфазной печи (в данном контексте постановки задачи), решалась только в 1/3 части печи с учетом соответствующих граничных условий.



Рисунок 5.3 - Сетка контрольных объемов, аппроксимирующих расчетную область задачи

В расчетной области учитывались все основные конструктивные элементы системы обдува электрода, оказывающие влияние на измене-

ние аэродинамических характеристик. Аппроксимация расчетной области производилась контрольными объемами; типичный вид модели представлен на рисунке 5.3, где количество контрольных объемов составило 2 639 805, число узлов 557 207.

Гидродинамические процессы в расчетной области описываются следующей системой уравнений:

$$\rho div(\mathbf{U}) = 0, \qquad (5.1)$$

ЗАО «Электротерм»

$$\rho \frac{\partial(U)}{\partial t} + \rho div(UU) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \cdot div(gradU) + \left[-\rho \frac{\partial(\overline{u'^2})}{\partial x} - \rho \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} - \rho \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z}\right] - (5.2)$$

$$\rho \frac{\partial(V)}{\partial t} + \rho div(V\mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \eta \cdot div(gradV) + \left[-\rho \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial x} - \rho \frac{\partial(\overline{v'^2})}{\partial y} - \rho \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial z}\right] + (5.3)$$

$$\rho \frac{\partial(W)}{\partial t} + \rho div(W\mathbf{U}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \cdot div(gradW) + \left[-\rho \frac{\partial(\overline{u'w'})}{\partial x} - \rho \frac{\partial(\overline{u'v'})}{\partial y} - \rho \frac{\partial(\overline{w'^2})}{\partial z}\right].$$
 (5.4)

где  $\rho$  - плотность [кг/м<sup>3</sup>];

U - вектор скорости [м/с];

U,V,W – х, у и z компоненты скорости соответственно [м/с];

Р - давление [Па];

 $\eta$  - динамическая вязкость [Па·с];

u', v', w' - флуктуации x, y, z компоненты скорости.

Для замыкания системы уравнений (5.1) – (5.4) используется k-є модель турбулентности, описываемая 2-мя уравнениями:

$$\rho \frac{\partial(k)}{\partial t} + \rho div(k\mathbf{U}) = div \left[ \frac{\eta_t}{\sigma_k} gradk \right] + 2\eta_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon; \qquad (5.5)$$

$$\rho \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial t} + \rho div(\varepsilon \mathbf{U}) = div \left[ \frac{\eta_t}{\sigma_{\varepsilon}} grad\varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\eta_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5.6)$$

где *k* - энергия турбулентных пульсаций;

ЗАО «Электротерм» 64



 $\eta_t$  - турбулентная вязкость;

*є* - энергия диссипации;

*Е*<sub>*ij*</sub> - деформация объема;

 $\sigma_{\kappa} = 1.00;$ 

 $\sigma_{\varepsilon}$ =1.30;

 $C_{l\varepsilon} = 1.44;$ 

 $C_{2\varepsilon} = 1.92.$ 

Турбулентная вязкость  $\eta_t$  определяется исходя из k и  $\varepsilon$ :

$$\eta_t = C_{\mu} \rho \mathcal{G} l = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon},$$

где  $\mathscr{G}$  - масштаб скорости  $\mathscr{G} = k^{1/2}$ ;

l – масштаб длины  $l = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ .

Для однозначного решения указанной системы уравнений и корректного решения задачи в целом были определены следующие граничные условия:

- на поверхности «S» заданы условия симметрии, которые соответствуют  $\vec{V}_{norm} = 0$  (рисунок 5.4);
- на поверхности «Out» заданы условия Opening с распределенным статическим давлением p = 1 атм. (рисунок 5.5);
- на поверхности «In» задан расход сухого воздуха Q=2.334 кг/с, что соответствует расходу Q=10 000 м<sup>3</sup>/ч. (рисунок 5.5).

Для решения поставленной задачи использовался пакет программ ANSYS CFX, который обеспечивает эффективное решение системы линейных уравнений многосеточным AMG методом с двойной точностью.

## 5.2 Результаты решения аэродинамической задачи

В результате расчета стационарных задач были получены результаты для следующих вариантов:

**Вариант 1** - существующая конструкция мантеля с диффузорным кольцом (с отверстиями, расположенными по периметру нижней части внутренней обечайки траверсы – см. Исходная модель, рисунок 1, Приложение В), с расходом воздуха 10 000 м<sup>3</sup>/ч при t=25<sup>0</sup> C; **вариант 2** - существующая конструкция мантеля без диффузорного кольца (кольцевая щель в нижней части внутренней обечайки траверсы), с расходом воздуха 10 000 м<sup>3</sup>/ч при t=25<sup>0</sup> C;

вариант 3 - конструкция с удлиненным мантелем без диффузорного кольца (см. Изменённая модель, рисунок 2, Приложение В), с расходом воздуха 10 000 м<sup>3</sup>/ч при t=25<sup>0</sup> C.



Рисунок 5.4 - Граничные условия симметрии

Рисунок 5.5 - Граничные условия окружающей среды

Ниже, на рисунках 5.6 ÷ 5.24, приведены результаты расчета, которые по полученным результатам сгруппированы следующим образом:

- **ШЕ ЗАО «Электротерм»** распределение давления в горизонтальном сечении на уровне существующего мантеля;
- распределение давления в горизонтальном сечении на уровне удлиненного мантеля (уровень контактных щек + 400 мм);
- распределение давления в горизонтальном сечении на уровне контактных щек;
- распределение скорости в горизонтальном сечении на уровне существующего мантеля;
- распределение скорости в горизонтальном сечении на уровне удлиненного мантеля (уровень контактных щек + 400 мм);
- распределение скорости в горизонтальном сечении на уровне контактных щек;
- распределение давления в вертикальной плоскости №1;
- распределение давления в вертикальной плоскости №2 (перпендикулярной к плоскости №1);
- распределение скорости в вертикальной плоскости №1;
- распределение скорости в вертикальной плоскости №2 (перпендикулярной плоскости №1);
- траектории мгновенных скоростей (линии тока). Вид на всю модель;
- траектории мгновенных скоростей (линии тока). Вид на входную часть воздуховода;
- векторное поле скоростей. Вид на всю модель.

















































































































## 5.3 Анализ результатов и рекомендации

1. В результате расчета определено, что падение давления между местом подвода воздуха и внешней средой при одинаковом расходе воздуха в 10 000 м<sup>3</sup>/ч, составляет:

ЗАО «Электвотевм»

- для Варианта 1 821 Па;
- для Варианта 2 155 Па;
- для Вариант 3 167 Па.

Анализируя разброс давлений и траектории мгновенных скоростей можно заключить – диффузорное кольцо в системе подачи воздуха является лишним и создает препятствие для равномерного распределения поля скоростей воздушных масс. Отсутствие диффузорного кольца (введение кольцевой щели) обеспечивает более крутые траектории движения воздуха вокруг кожуха электрода с увеличением угла наклона винтовой линии, что способствует формированию более долговременного контакта между воздухом и кожухом электрода, а это, в свою очередь, приводит к более эффективному прогреву подаваемого воздуха и повышению эффективности охлаждения электрода.

2. Для усиления интенсивности охлаждения кожуха электрода в зоне выше контактных щек необходимо увеличение расхода воздуха до 15000 ÷ 20000 м<sup>3</sup>/час (на электрод) с одновременным увеличением на 30% зазора между мантелем и электродом. При этом использование вентиляторов с увеличенной подачей воздуха будет создавать следующие падения давления:

- для Варианта 1 821×4=3284 Па;
- для Варианта 2 155×4=620 Па;
- для Вариант 3 167×4=668 Па.

3. Анализ результатов расчета выявил существенные преимущества Варианта 3 перед Вариантом 2 с точки зрения использования воздушного потока для удаления пыли из зазора между контактными щеками и кожухом электрода. Вариант 3 является предпочтительным, так как обеспечивает существенно более высокую тангенциальную составляющую скорости потока в зазоре, чем Вариант 2, - на 2 ÷ 3 м/с.

## 5.4 Изменения, предлагаемые внести в конструкцию узла

В соответствие с анализом расчётов аэродинамики системы обдува электрода определились два варианта изменения системы обдува:

**1 вариант** - увеличение расхода воздуха до 15000 ÷ 20000 м<sup>3</sup>/час (на электрод) с одновременной модернизацией траверсы гидроподъёмника и переделкой мантеля. Вариант трудозатратный, т.к. связан с большим объёмом переделок;

2 вариант - сохранение расхода воздуха с переделкой воздуховодов системы обдува электрода. Вариант спорный в плане возможности размещения и крепления воздуховодов.

Конструкция и объём переделок по варианту 1 представлены в Приложении В на рисунках ЗА, ЗБ, ЗВ, ЗГ и таблице 5.1.

Примечание – для обеспечения достаточной прочности "новой" траверсы гидроподъёмника были рассчитаны напряжения, перемещения и коэффициенты запаса прочности, возникающие в существующей и "новой" траверсах от приложенных к ним нагрузок. Результаты анализа существующей траверсы и модернизированной траверсы представлены на рисунках 4.25, 4.26, 4.27, 4.28. Расчёты выполнены с помощью компьютерного анализа 3-D моделей траверс.

Конструкция и объём переделок по варианту 2 представлены в Приложении В на рисунках 4А, 4Б и таблице 5.2.

Примечание – опираясь на данные, полученные при расчёте 3-D модели траверсы, рекомендуем произвести усиление существующей траверсы аналогично предлагаемым на рисунках 3В и 3Г Приложения В.

Таблица 5.1

ЗАО «Электротерм» 126

О «Электпотепм»

Элемент конструкции	Вносимые изменения				
Элемент конструкции 1. Траверса гидроподъёмника	<ul> <li>А) отверстия в диффузоре (выноска 1, рисунок ЗА), расположенные под местами опоры устройства пере- пуска на траверсу, заварить с по- мощью закладных платиков и уси- лить поверху обечайки накладной пластиной толщиной не менее 10 мм (на рисунках условно не показа- на);</li> <li>Б) отверстия диффузора, располо- женные между местами опоры, объ- единить в одну длинную щель. Т.о. мы получим 4 щелевых сектора – см. выноска «1» на рисунке ЗА и рисунок 3Г;</li> <li>В) в воздухоподводящий патрубок</li> </ul>				
	траверсы снизу (на высоту 1/3 вы- соты отверстия патрубка) вварить разделительную пластину – см. вид «Е», рисунок 3В; Г) для повышения прочности кон- струкции траверсы произвести её усиление – см. выносные элементы «В» и «Д» на рисунке 3В и рисунок 3Г.				
2. Мантель	<ul> <li>А) обрезать существующий мантель на уровне, приблизительно указан- ном на рисунке 3Б;</li> <li>Б) изготовить и пристыковать но- вый мантель с увеличенным до 80 мм зазором «мантель - электрод»;</li> <li>В) удлинить мантель (точнее ту его часть, которая принадлежит токо- подводу), приблизив его к верхнему торцу контактных щёк на расстоя- ние не менее 500 мм</li> </ul>				
3. Гидроплунжер	без изменений				
4. Плита опорная	без изменений				
5. Кожух направляющих роликов	<ul> <li>A) собственно кожух – без из- менений;</li> <li>Б) конструкцию опорных роли- ков необхолимо изменить</li> </ul>				

	🧾 ЗАО «Электротер				
Элемент конструкции	Вносимые изменения				
1. Траверса гидроподъёмника	<ul> <li>А) воздухоподводящий патрубок траверсы заглушить пластиной - см. выносной элемент «Б» на ри- сунке 4А;</li> <li>Б) для повышения прочности кон- струкции траверсы рекомендуется произвести её усиление – см. вы- носные элементы «В» и «Д» на ри- сунке 3В и рисунок 3Г</li> </ul>				
2. Мантель	<ul> <li>А) врезать под углом новый патрубок воздуховода;</li> <li>Б) для создания аэродинамического сопротивления расширить изолирующую пластину, установленную в месте электроразъёма мантеля;</li> <li>В) рекомендуется удлинить мантель (точнее ту его часть, которая принадлежит токоподводу), приблизив его к верхнему торцу контактных щёк на расстояние не менее 500мм;</li> <li>Г) всё остальное без изменений</li> </ul>				
3. Гидроплунжер	без изменений				
4. Плита опорная	без изменений				
5. Кожух направляющих роликов	без изменений				





# 6 Электромагнитный расчёт электропечи как одного из составляющих элементов расчёта теплового поля электрода

ЗАО «Электротерм»

Электромагнитный расчёт электропечи производился по числовым моделям, которые строились на базе исходной 3-D модели (Приложение В, см. рисунок 1). На рисунке 6.1 представлена уменьшенная копия исходной 3-D модели.



Рисунок 6.1 - Исходная САД- 3-Д модель.

# 6.1 Исходные данные

*6.1.1* Зависимость удельного электросопротивления материала электрода от температуры и вертикальной координаты<sup>1</sup>, представлены в таблице 6.1.

6.1.2 Удельное электросопротивление материала электрода в зависимости от температуры в пределах выше зоны спекания принимает значения [2]:

t, <sup>0</sup> C	750	700	600	500	400	300
ρ, 10 <sup>-6</sup> Ом×м	120	300	1200	3400	5700	8000

<sup>1</sup> Значения получены на основе обработки данных статей [20, 21]

Таблица 6.1 - Зависимость удельного электросопротивления материала (ρ, 10<sup>-6</sup> Ом×м) электрода от температуры и вертикальной координаты<sup>2</sup>

ЗАО «Электвотевм»

<i>T</i> , C	x'										
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	85,18	52,15	43,51	42,28	40,73	37,44	34,29	33,53	34,79	32,10	10,90
100	80,00	49,02	41,23	40,30	38,83	35,47	32,12	31,10	32,27	30,27	11,63
200	75,11	46,16	39,10	38,40	36,99	33,62	30,15	28,89	29,94	28,51	12,23
300	70,53	43,56	37,14	36,59	35,23	31,89	28,35	26,91	27,83	26,86	12,73
400	66,25	41,20	35,33	34,87	33,56	30,28	26,74	25,15	25,93	25,33	13,17
500	62,27	39,08	33,67	33,26	31,99	28,81	25,31	23,62	24,24	23,94	13,58
600	58,57	37,18	32,17	31,76	30,52	27,47	24,06	22,31	22,79	22,72	13,99
700	55,18	35,49	30,81	30,37	29,17	26,27	23,00	21,22	21,57	21,68	14,45
800	52,07	34,00	29,60	29,10	27,93	25,21	22,12	20,36	20,58	20,84	15,00
900	49,25	32,71	28,54	27,95	26,83	24,31	21,42	19,71	19,85	20,23	15,66
1000	46,71	31,59	27,61	26,94	25,86	23,56	20,91	19,29	19,36	19,88	16,47
1100	44,46	30,64	26,82	26,06	25,04	22,97	20,58	19,08	19,13	19,79	17,48
1200	42,48	29,86	26,16	25,32	24,37	22,54	20,43	19,10	19,17	19,99	18,71
1300	40,79	29,21	25,64	24,74	23,86	22,28	20,47	19,33	19,48	20,50	20,21
1400	39,37	28,71	25,24	24,30	23,52	22,20	20,69	19,77	20,06	21,35	22,01
1500	38,22	28,33	24,97	24,03	23,36	22,30	21,09	20,44	20,93	22,55	24,14
1600	37.35	28.07	24 82	23 92	23 39	22.58	21.68	21.32	22.08	24 12	26.65

Приведенные значения соответствуют участкам электрода от нижней кромки щек до нижнего торца электрода. Координата x' отнесена к высоте электрода в пределах этих участков:  $x' = x/(H_1 + H_2)$ , где начало координата x' соответствует нижней кромке щек.

6.1.3 Согласно [16] удельное электросопротивление шихты  $\rho_{uu}$  равно  $82 \times 10^{-4}$  Ом·м.

6.1.4 Задаваемые физические свойства холоднокатаной листовой стали:  $\rho_{cm} = 0.26 \times 10^{-6} \text{ Ом·м}; \ \mu_{cm} = 200.$ 

6.1.5 Задаваемые физические свойства нержавеющей стали (боковые экраны охлаждения):  $\rho_{\mu.cm} = 1 \times 10^{-6}$  Ом·м;  $\mu = 1$ .

6.1.6 Задаваемые физические свойства меди:  $\rho_{M} = 1.7 \times 10^{-8}$  Ом·м;  $\mu_{M} = 1$ .

# 6.2 Математическая модель задачи

Для выполнения электромагнитного расчёта была создана матема-

тическая модель, которая в расчетной области учитывала все основные

<sup>2</sup> Значения получены на основе обработки данных статей [20, 21]

ЗАО «Электротерм» конструктивные элементы, оказывающие влияние на распределение электромагнитного поля. Аппроксимация расчетной области производилась конечными элементами. Типичный вид модели и построенная КЭ сетка, представлены на рисунках 6.2 – 6.7.









Рисунок 6.7- Сетка конечных элементов аппроксимирующих элементы конструкции

Количество конечных элементов (SOLID 97) составило 3 112 000, количество число узлов 2 769 000.

Электродинамические процессы в расчетной области описываются следующей системой уравнений в комплексном виде [22]:

$$rot H = \gamma E; (6.1)$$

$$ot \vec{E} = -j\omega\mu_a \vec{H} ; \qquad (6.2)$$

$$liv B = 0$$
; (6.3)

$$B = \mu \mu_0 H \quad , \tag{6.4}$$

где Н и Е - напряженность магнитного и электрического полей;

В- индукция магнитного поля.

Для решения указанной системы уравнений используем переход к векторному магнитному потенциалу [22, 23, 24]. Для однозначного решения указанной системы уравнений и корректного решения задачи в целом были определены следующие граничные условия:

ЗАО «Электротерм»

- на поверхностях «S» - концах проводников, задавались токи или напряжения (рисунок 6.8);

- на внешней поверхности расчетной области заданы нормальные условия для векторного потенциала А [22].



Рисунок 6.8- Медные элементы

Для решения поставленной задачи использовался пакет программ Ansys Emag, который обеспечивает эффективное решение системы линейных уравнений с разряженными матрицами методом LU разложения и различными вариациями метода Галецкого с предопределенными невязками.

### 7 Расчёт теплового поля электрода

ЗАО «Электротерм»

В ходе расчета определялись тенденции изменения положения зоны коксования:

- при изменении расхода воздуха, подаваемого на обдув электрода;
- при изменении расхода воды для охлаждения контактной щеки;
- при изменении напряжения на электроде.

Кроме этого, в процессе расчёта определялось влияние на зону коксования варианта модернизации короткой сети – вариант, в котором четыре наиболее нагруженные током трубы подключены к периферийным контактным щекам (см. Изменённая модель, рисунок 2, Приложение В).

Все расчеты проведены для конструкции не содержащей диффузорное кольцо и имеющей удлиненный мантель (вариант 3 при расчёте аэродинамики системы обдува электрода - см. Изменённая модель, рисунок 2, Приложение В).

#### 7.1 Математическая модель задачи

Для решения поставленной задачи использовались математические модели аэродинамики воздушных масс, рассмотренной в разделе 5 данного отчёта, а также математические модели электромагнитного расчета электропечи, рассмотренного в разделе 6 данного отчета.

Расчет представляет собой решение сложных сопряженных нестационарных, нелинейных задач - электромагнитной, тепловой и гидродинамической - последовательное решение которых выполняется итерационно.

Итерации совершаются следующим образом: производится решение электромагнитной задачи, в результате чего определяются внутренние источники теплоты; найденные внутренние источники теплоты являются исходными данными для проведения теплового расчета, с

# **ЗАО «Электротерм»** учетом аэдродинамики воздушных масс, позволяющей точно определить локальные коэффициенты теплоотдачи, в результате получается измененная картина распределения температуры в системе. Изменившиеся температурные условия определяют изменение удельных сопротивлений материалов, а также их тепловых характеристик (коэффициента теплопроводности, теплоемкости), что приводит к необходимости повторного решения электромагнитной задачи и т.д. Итерации прекращаются, когда температуры в узлах сетки на предыдущей и текущей итерации не будут отличаться друг от друга на величину более 5%.

## 7.2 Используемое программное и аппаратное обеспечение

Расчёт теплового поля электрода производился с помощью программы Ansys Multiphysics. Ansys Multiphysics – многоцелевой комплекс программ, представляющий собой систему математического анализа различных физических процессов – теплофизических, электродинамических, акустических, процессов разрушения и деформации тел и др. Задачи, решаемые в Ansys, могут решаться в трехмерной нестационарной постановке и могут быть решены как связанные или многодисциплинарные, т.е. когда создается итерационная схема расчета физического процесса. Отличительной особенностью программного комплекса Ansys Multiphysics является возможность анализировать физические процессы протекающие в сложных установках и системах, для чего в программном комплексе предусмотрены алгоритмы построения расчетной сетки по геометрии построенной в CAD системе и решение полученных систем линейных алгебраических уравнений различными алгоритмами, включая эффективное многопроцессорное распараллеливание решения. На сегодня корпорация Ansys является лидером в области создания ПО для математического моделирования физических процессов, а пакет Ansys Multiphysics имеет сорокалетнюю историю.

# 🧾 ЗАО «Электротерм»

Пакет программ Ansys CFX, является ориентированным на расчет теплофизических процессов и представляет собой систему, основанную на методе контрольных объемов (модификация метода конечных элементов) и использовании многосеточных решателей (AMG) систем линейных уравнений. В настоящий момент является одной из трех общепризнанных систем, включая Fluent и Star CD, которые используются для расчета всего диапазона процессов в машино-, авиа, ракетостроении химической промышленности и др. областях. Позволяет эффективно решать задачи большой размерности при протекании в области решения до 50 хим. реакций одновременно с учетом радиационного, конвективного и кондуктивного теплообмена.

Решение задачи производилось на кластерной системе с характеристиками:

- количество процессоров Intel Xeon 5350 7 шт;
- частота процессора 2.7 ГГц;
- общее количество ядер в системе -7x4 = 28шт;
- суммарный объем оперативной памяти 132 Гб;
- тип жестких дисков SAS диски с RAID массивом 3-го уровня;
- объем памяти жестких дисков 1.3 Тб;
- количество расчетных узлов 7 шт;

тип интерфейса передачи данных между узлами – Ethernet Gigabit
 в течение 10 – 30 часов на одну сопряженную (электромагнитную + те пловую совместно с гидродинамической) итерационную задачу.

### 7.3 Результаты решения тепловой задачи

В результате расчета были получены изоповерхности температуры нижней ( $t = 420 \ ^{o}C$ ) и верхней ( $t = 500 \ ^{o}C$ ) границы фронта коксования для следующих вариантов:

вариант 1 - температура поверхности контактных щек 60<sup>°</sup>C; действующее значение напряжения на электродах 100 В; расход воздуха 10000 м3/час; существующая короткая сеть;

вариант 2 - температура поверхности контактных щек 60<sup>°</sup>C; действующее значение напряжения на электродах 100 В; расход воздуха 5000 м3/час; модернизированная короткая сеть;

вариант 3 - температура поверхности контактных щек 60°С; действующее значение напряжения на электродах 100 В; расход воздуха 10000 м3/час; модернизированная короткая сеть;

вариант 4 - температура поверхности контактных щек 60°С; действующее значение напряжения на электродах 100 В; расход воздуха 30000 м3/час; модернизированная короткая сеть;

**вариант 5** - температура поверхности контактных щек 40<sup>0</sup>С; действующее значение напряжения на электродах 100 В; расход воздуха 10000 м3/час; модернизированная короткая сеть;

**вариант 6** - температура поверхности контактных щек 80<sup>°</sup>C; действующее значение напряжения на электродах 100 В; расход воздуха 10000 м3/час; модернизированная короткая сеть;

вариант 7 - температура поверхности контактных щек 60<sup>°</sup>C; действующее значение напряжения на электродах 105 В; расход воздуха 10000 м3/час; модернизированная короткая сеть;

**вариант 8** – температура поверхности контактных щек 60<sup>°</sup>C; действующее значение напряжения на электродах 110 В; расход воздуха 10000 м3/час; модернизированная короткая сеть.

На рисунке 2.1 ÷ рисунке 2.16 приведены рассчитанные изоповерхности для соответствующих вариантов.

«Электпотепм»
































### 7.4 Анализ результатов и рекомендации

1. В результате расчета определено, что температурное поле в зоне коксования электрода в электропечи с существующей короткой сетью является несимметричным относительно оси электрода (см. рисунок 7.1 и рисунок 7.2).

2. Изменение короткой сети (в которой четыре наиболее нагруженные током трубы подключены к периферийным контактным щекам) приводит к симметрированию температурного поля в зоне коксования электрода относительно его продольной оси (см. рисунки 7.1, 7.2 и 7.5, 7.6). Поэтому можно рекомендовать для улучшения теплового режима работы электрода применение короткой сети с такой модернизацией.

3. Увеличение расхода охлаждающего воздуха в зазоре между мантелем и электродом с 5000 м<sup>3</sup>/час до 30000 м<sup>3</sup>/час приводит к незначительному снижению зоны коксования. Однако, это приводит к существенному снижению температуры и уровня зоны жидкой электродной массы. В связи с этим, является целесообразным повышение расхода охлаждающего воздуха до 20000 м<sup>3</sup>/час на каждый электрод (см. рисунки 7.3, 7.4, рисунки 7.5, 7.6, рисунки 7.7, 7.8).

4. Реальные расходы охлаждающей воды в контактных щеках, обеспечивающие температуру на рабочей поверхности щек в диапазоне 40 – 80<sup>0</sup>C, практически не влияют на температурную изотерму зоны коксования (см. рисунки 7.9, 7.10, рисунки 7.5, 7.6, рисунки 7.11, 7.12). В связи с этим, является не целесообразным использование канала изменения расхода охлаждающей воды в контактных щеках для изменения положения зоны коксования электрода.

5. Выявлено, что изменение действующего значения напряжения на электродах в диапазоне от 100 В до 110 В приводит к существенному повышению уровня зоны коксования относительно нижнего среза

ЗАО «Электротерм»

**ЗАО «Электротерм»** контактных щек (см. рисунки 7.5, 7.6, рисунки 7.13, 7.14, рисунки 7.15, 7.16). Повышение напряжения на электродах приводит к увеличению плотности тока и, как следствие, мощности внутренних источников тепла в электроде, обеспечивая смещение вверх изотермы зоны коксования относительно нижнего среза контактных щек. Поэтому можно рекомендовать для улучшения теплового режима работы электродов увеличение на 10% действующего значения линейного напряжения на электродах. Вторым вариантом улучшения работы самоспекающегося электрода в имеющейся печи при имеющемся питающем напряжении трансформатора может быть уменьшение диаметра электрода.

🖳 ЗАО «Электротерм»

## 8 Рекомендации

По результатам работы определились три варианта решения поставленной задачи:

1 вариант: Уменьшение диаметра электрода	
<i>d</i> <sub>э</sub> = 1300 мм , естественный соѕф (см. п/п 4.3)	$d_3 = 1350 \text{ мм},$ $cos \varphi = 0.92 (см. п/п 4.1)$
<ul> <li>А) Электрические параметры:</li> <li>номинальный ток электрода I<sub>э</sub> =81,13 кА;</li> <li>напряжение на электроде U<sub>э</sub> = 82,9 B;</li> <li>ступени напряжения с сохранением постоянства мощности 172 - 210 B;</li> <li>максимальный ток электрода</li> </ul>	<ul> <li>А) Электрические параметры:</li> <li>номинальный ток электрода I<sub>3</sub> =89,72 кА;</li> <li>напряжение на электроде U<sub>3</sub> = 87,16 B;</li> <li>ступени напряжения с сохранением постоянства мощности 157 - 192 B;</li> <li>максимальный ток электрода</li> </ul>
<ul> <li>I<sub>э.max</sub> = 92,75 кА</li> <li>Б) Геометрические параметры:</li> <li>диаметр распада электродов D<sub>p.э</sub> = 3,45м;</li> <li>диаметр ванны D<sub>e</sub> = 7,37м;</li> <li>высота ванны H<sub>e</sub> = 2,63-2,9м</li> </ul>	<ul> <li><i>I</i><sub>э.max</sub> = 101,6 кА</li> <li>Б) Геометрические параметры:</li> <li>диаметр распада электродов <i>D</i><sub>p.э</sub> = 3,55м;</li> <li>диаметр ванны <i>D</i><sub>e</sub> = 7,6м;</li> <li>высота ванны <i>H</i><sub>e</sub> = 2,71-3,01м</li> </ul>
<ul> <li>В) Конструктивные особенности:</li> <li>изменение токоподвода ;</li> <li>переделка мантеля с уменьшением его поперечных размеров до размеров, обеспечивающих зазор «мантель - электрод» 80мм;</li> <li>сохранение короткой сети;</li> <li>сохранение трансформаторов;</li> <li>сохранение системы обдува электрода;</li> <li>сохранение траверс гидроподъеймников;</li> <li>установка новых устройств перепуска электродов</li> </ul>	<ul> <li>В) Конструктивные особенности:</li> <li>изменение токоподвода;</li> <li>сохранение короткой сети;</li> <li>сохранение трансформаторов;</li> <li>сохранение системы обдува электрода, но с увеличением расхода воздуха до 15000м<sup>3</sup>/ч;</li> <li>сохранение гидроподъёмников;</li> <li>модернизация устройств перепуска электродов</li> </ul>

<i>соѕф</i> = <b>0,92</b> (см. п/п 4.4)	естественный сояф (см. п/п 4.5)
<ul> <li>4) Электрические параметры:</li> <li>установленная мощность трансформаторов, <i>S</i> =30MBA;</li> <li>номинальный ток электрода <i>I</i><sub>2</sub> =95,27 кА;</li> <li>напряжение на электроде <i>U</i><sub>2</sub> = 89,8 B;</li> <li>ступени напряжения с сохранением постоянства мощности 162 - 198 B;</li> </ul>	<ul> <li>A) Электрические параметры:</li> <li>установленная мощность трансформаторов, <i>S</i> =34,4MBA</li> <li>номинальный ток электрода <i>I</i><sub>2</sub> =95,72 кА;</li> <li>напряжение на электроде <i>U</i><sub>2</sub> = 89,8 B;</li> <li>ступени напряжения с сохранением постоянства мощности 186 - 227 B;</li> </ul>
• максимальный ток электрода <i>I</i> <sub>э.max</sub> = 107,7 кА	<ul> <li>максимальный ток электрода</li> <li><i>I</i><sub>э.max</sub> = 106,9 кА</li> </ul>
<ul> <li>Б) Геометрические параметры:</li> <li>диаметр распада электродов D<sub>p.э</sub> = 3,7м;</li> <li>диаметр ванны D<sub>e</sub> = 7,96м;</li> <li>высота ванны H<sub>e</sub> = 2,82-3,13м</li> </ul>	<ul> <li>Б) Геометрические параметры:</li> <li>диаметр распада электродов D<sub>p.э</sub> = 3,7м;</li> <li>диаметр ванны D<sub>e</sub> = 7,96м;</li> <li>высота ванны H<sub>e</sub> = 2,82-3,13м</li> </ul>
<ul> <li>В) Конструктивные особенности:</li> <li>сохранение конструктивного исполнения токоподвода, но с изменением расшихтовки токоподводящих труб – см. Изменённая модель, рисунок 2, Приложение В;</li> <li>изменение системы обдува электрода по одному из двух вариантов –см. п/п 5.4;</li> <li>изменение короткой сети;</li> <li>изменение трансформаторов</li> </ul>	<ul> <li>В) Конструктивные особенности:</li> <li>сохранение конструктивного исполнения токоподвода, но с изменением расшихтовки токоподводящих труб – см. Изменённая модель, рисунок 2, Приложение В;</li> <li>сохранение короткой сети;</li> <li>сохранение короткой сети;</li> <li>сохранение системы обдува электрода, но с увеличением расхода воздуха до 15000м<sup>3</sup>/ч;</li> <li>сохранение гидроподъёмников;</li> <li>модернизация устройств перепуска электродов</li> </ul>

# Зао «Электротерм» З вариант: Сохранение существующего диаметра электрода с сохранением существующих трансформаторов А) Электрические параметры – без изменения; Б) Геометрические параметры – без изменения; В) Конструктивные особенности: сохранение существующих трансформаторов; сохранение существующей короткой сети; сохранение существующей короткой сети;

- сохранение существующего гидроподъёмника;
- изменение расшихтовки токоподводящих труб токоподвода см. рисунки 5А и 5Б, Приложение В;
- изменение формы контактной щеки см. рисунки 5А и 5Б, Приложение В;
- удлинение мантеля до уровня 400-500мм выше верхнего торца контактных щёк;
- рекомендуется изменить количество и конструкцию боковых экранов токоподвода см. рисунки 5А и5Б, приложение В.
- изменение системы обдува электрода по второму варианту –см. п/п 5.4.

### Примечания:

– первые два варианта рассчитаны, исходя из обеспечения рекомендуемого значения плотности тока в электроде, что позволяет обеспечить нормальную работу электрода. С точки зрения капитальных затрат – варианты затратные, требующие значительной переделки основной массы узлов печи;

- третий вариант, сохраняя существующий диаметр электрода, существующие трансформаторы, короткую сеть, гидроподъёмники, устройства перепуска, за счёт предложенных мер позволяет несколько улучшить работу электрода: поднять зону коксования относительно нижнего торца контактных щёк и снизить уровень жидкой массы. С точки зрения капитальных затрат - наиболее приемлемый вариант.

### Список литературы

1. Струнский Б.М., «Руководящие указания по эксплуатации руднотермичесих печей», М. «Металлургиздат», 1951.

ЗАО «Электротерм»

- 2. Гасик М.И., «Самообжигающиеся электроды рудовосстановительных печей», М. «Металлургия», 1978, 368с.
- Короленко Ю.А. и др., «Математическое моделирование тепловых процессов в самообжигающемся электроде» - Электротехническая промышленность. Серия «Электротермия», 1976, выпуск №6(166).
- Хитрик С.И., Гасик М.И. и др., «Эксплуатация самообжигающихся электродов ферросплавных печей» - Информация ЦНИИЧМ. Серия «Ферросплавное производство», 1976, №7.
- Гасик М.И., Рагулина Р.И. и др., «Производство и эксплуатация самообжигающихся электродов и анодов», М. «Металлургия», 1965.
- Технический отчёт «Исследование, разработка оптимальных параметров и рациональных конструктивных решений ферросплавной печи мощностью 25 MBA с низким зонтом для выплавки ФС-75 и ФС-90», ВНИЭТО. Москва-Ермак, 1991.
- «Опыт эксплуатации самообжигающихся электродов диаметром 1400мм на ферросплавных электропечах» - Электротехническая промышленность. Серия «Электротермия», 1976, выпуск №7(167).
- Рабинович В.Л., Лыков А.Г. и др., «Влияние вторичного токоподвода на тепловое поле самообжигающегося электрода » - Электротехническая промышленность. Серия «Электротермия», 1976, выпуск №8(168).
- 9. Струнский Б.М., «Расчёты руднотермических печей», М. «Металлургия», 1982, 192с.
- 10. Гаврилов В.А., Поляков И.И., Поляков О.И., «Оптимизация режимов работы ферросплавных печей», М. «Металлургия», 1996, 176с.

# 📴 ЗАО «Электротерм»

- 11 Фролов Ю.Ф. и др., «Исследование работы электродного зажима с сильфонными гидроприжимами электроконтактных щёк» - Электротехническая промышленность. Серия «Электротермия», 1981, выпуск №3(220).
- Горбенко В. И., Короленко Ю.А., «Теплообмен в зоне контакта «щека - электрод» рудовосстановительных печей». Сборник научных трудов Челябинского политехнического института, 1971. №191.
- Розенберг В.Л. и др., «Анализ теплового поля и надёжность работы самообжигающегося электрода с помощью ЭВМ» Электротехническая промышленность. Серия «Электротермия», 1976, выпуск №8(168).
- «Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей». Справочное изд. Данцис Я.Б., Кацевич Л.С., Жилов Г.М. и др./ 2-е изд., перераб. и доп. – М. «Металлургия». 1987. 320с.
- 15. Ахметшин Н.Ф., Бэрзшкин И.И., «Электрические и геометрические параметры ферросплавных электропечей». Материалы IV Всесоюзного научно-технического симпозиума «Параметры рудовосстановительных печей, совершенствование конструктивных элементов и проблемы управления процессами», М. «Информэлектро», 1987.
- 16. Струнский Б.М., «Расчёты руднотермических печей», М «Металлургия», 1982, 192с.
- 17. Никольский Л.Е и др, «Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры». М, «Энергия», 1971, 272с.
- «Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева». Под ред. Свенчанского А.Д. М. «Энергоиздат», 1984, 296с.

- 📴 ЗАО «Электротерм»
- 19. Данцис Я.Б., « Методы электротехнических расчётов руднотермических печей». Л, «Энергия», 1973, 184с.
- 20. Хитрик С, Гасик М.И.,. Кушнарев В.Г,. Лагунов Ю.В., «Удельное электрическое сопротивление самоспекающихся электродов при высоких температурах»
- «Исследование теплового поля самоспекающихся электродов мощных рудовосстановительных электропечей» - Электротехническая промышленность. Серия Электротермия, 1967, вып 56.
- 22. Бессонов Л.А., «Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле». М, «Гардарики», 2001. – 317 с.
- Кислицин А.Л. и др., «Расчет магнитных полей электрических машин методом конечных элементов». Изд-во Саратовского университета, 1980. – 200 с.
- Демирчан К.С., Чечурин. В.Л., «Машинные расчеты электромагнитных полей». Уч.пособ. для эл.техн. и энерг. спец. вузов. М. «Высшая школа», 1986. – 240 с.
- 25. Ерко В.И., Солошенко В.П., Гасик М.И., Поляков О.И., «Взаимосвязь геометрических параметров и электрических характеристик ферросилициевых электропечей различной мощности». Днепропетровск, 2002.