

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.Н. Тимофеев

подпись инициалы, фамилия

«_____» _____ 2016г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02.11 – Электроэнергетика и электротехника код – наименование направления

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС “МИКСЕР-МГД-НАСОС” ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОРОШКА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа БР по теме «Электротехнический комплекс
“миксер-МГД-насос” для производства порошка на основе алюминия»

Нормоконтролер

подпись, дата

М.В. Первухин
ициалы, фамилия

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

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2016 г.

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

Студенту Буйневичу Анатолию Андреевичу

Группа ФЭ 12-07Б Направление (специальность) 13.03.02

Электроэнергетика и Электротехника

Тема выпускной квалификационной работы: «Электротехнический комплекс "миксер - МГД насос" для производства порошка на основе алюминия».

Утверждена приказом по университету № 5283/сот 19.04.2014

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

Исходные данные для БР:

- 1 Физическая модель кондукционного МГД-насоса;
- 2 Транспортируемый металл-расплав алюминия;
- 3 Температура транспортируемого расплава: 720С;
- 4 Расплав: технический алюминий;
- 5 Требуемый уровень поддержания расплава в раздаточной емкости: 300-400 мм;

Перечень разделов БР

- 1 Введение
- 2 Кондукционные насосы для транспортировки расплавов на основе алюминия, их вариации. Особенности существующих современных конструкций и патентный поиск.
- 3 Конструирование теплоизоляции металлопровода МГД-насоса для производства порошка на основе алюминия
 - а) вариант расчёта теплоизоляции металлопровода с преобладающей толщиной лёгкого бетона
 - б) вариант расчёта теплоизоляции металлопровода с преобладающей толщиной внешнего теплоизоляционного слоя
- 4 Список используемой литературы
- 5 Перечень графического материала:
Основные узлы комплекса: Футеровка МГД-насоса (разрезы, местные виды, необходимая детализировка).

Руководитель БР

подпись

Д.А. Михайлов

инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

А.А. Буйневич

инициалы, фамилия

«01» октября 2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Кондукционные насосы для транспортировки расплавов на основе алюминия.	7
1.1 Основные положения. Существующие проблемы	7
1.2 Принцип работы МГД-насосов	7
1.3 Основные характеристики насосов	10
1.4 Основные виды МГД-насосов	11
1.5 Классификация кондукционных насосов.....	12
1.5.1 Кондукционные МГД-насосы переменного тока	12
1.5.2 Кондукционный насос с тройниками рабочими зонами и одновитковым каналом МДН-З.....	14
1.5.3 Кондукционный насос с прямоточными крестообразными рабочими зонами МДН-13	15
1.5.4 Кондукционный насос типа МДН-6.....	16
1.5.5 МГД-насос «Пуш-пуль»	17
1.6 Обзор используемых в современной металлургии кондукционных МГД-насосов	18
1.7 Вывод	23
2 Электрический расчет	24
2.1 Расчет индуктора с каналом	24
2.2 Расчет электромагнита.....	28
2.3 Выводы по разделу.....	29
3 Термический расчет	30
3.1 Расчет под и вне индуктора с обмазкой 17 и 10 мм	30
3.1.1 МГДН КТ-10. Футеровка канала вне области под индуктором	30
3.1.2 МГДН КТ-10. Футеровка канала вне области вне индуктора	34
3.1.3 МГДН КТ-10. Футеровка канала вне области под индуктором	38
3.1.4 МГДН КТ-10. Футеровка канала вне области вне индуктора	42
3.1.5 Выводы по разделу	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	48

ВВЕДЕНИЕ

Насосы относятся к МГД-устройствам напорного типа и работают в трех режимах: двигателя, тормоза и генератора. Магнитогидродинамическим насосом называется устройство, служащее для увеличения в основном потенциальной энергии несжимаемой рабочей среды при помощи преобразования энергии с использованием закономерностей магнитной гидродинамики. Другими словами, металлургический МГД-насос осуществляет прямое преобразование энергии электромагнитного поля в механическую энергию потока жидкого металла. МГД-насосы разделяются на кондукционные, в которых ток в жидком металле имеет внешний источник и подводится твердыми контактами, и индукционные, в которых рабочий ток индуцируется в жидком металле переменным магнитным полем.

В процессе плавильно-литейного производства сплавов цветных металлов возникает потребность транспортирования и регулирования подачи расплавов из печей-миксеров. Кондукционные МГД-насосы позволяют получить относительно большие электромагнитные давления в небольших рабочих зонах. Работая в режиме «двигатель» МГД-насос преобразует электрическую энергию в механическую энергию движения расплава, преодолевая гидравлическое сопротивление металлопровода и поддерживает заданный расход. При работе в режиме «тормоз» (противовключение) создаваемое электромагнитное давление направлено против движения расплава, при этом происходит уменьшение расхода или провод полностью запирается. Электромагнитные характеристики кондукционных МГД-насосов-дозаторов позволяют полностью автоматизировать процесс транспортирования и дозирования расплавов металлов.

1 Кондукционные насосы для транспортировки расплавов на основе алюминия.

1.1 Основные положения. Существующие проблемы

В настоящее время магнитогидродинамические устройства и технологии управлением потоками проводящих жидкостей получили широкое распространение в различных областях техники. Одним из технологических процессов при получении алюминиевых сплавов, стабильность которой определяет качество этих сплавов, является процесс доставки расплава алюминия до конвейеров и кристаллизаторов литьевых машин. Поэтому металлурги пытаются наладить автоматизацию и механизацию этого процесса, что на практике очень трудно достичь из-за агрессивности жидкого алюминия и его повышенной окисляемости. Существуют механические способы дозированной подачи металла, однако они недостаточно надежны, или очень дороги.

Применение магнитогидродинамических устройств для бесконтактного воздействия на жидкий металл было предложено Л.А. Верте в середине XX века. С тех пор многие ученые посвятили свои исследования проблеме автоматизированной выдачи алюминия из стационарных миксеров. Однако до настоящего времени нет надежного МГД-устройства, которое бы полностью удовлетворяло требованиям технологии производства алюминиевых сплавов и надежной эксплуатации.

Одной из основных проблем кондукционных МГД-устройств metallurgического назначения является обеспечение надежного контакта жидкого металла с токоподводами внешней цепи. Если жидкий металл не смачивает поверхности электродов или смачивание идет по окисным пленкам, в этом случае контактное сопротивление очень велико и определяется сопротивлением окисного слоя. По этой причине МГД-насосы с электродами значительно уступают по надежности МГД-насосам трансформаторного типа, в которых контактная пара (твердотельный электрод–расплав) заменена жидкometаллическим контактом. Ввиду этого, МГД-насосы трансформаторного типа получили наибольшее распространение. Главной проблемой остается быстрое зарастание каналов МГД-устройств окислами.

1.2 Принцип работы МГД-насосов

Принцип устройства кондукционного электромагнитного насоса постоянного тока для транспортных жидких металлов показан на рисунке 1.

Между полюсами электромагнита 2 расположен канал с жидким металлом 1, к боковым граням которого приварены электроды 3. От внешнего источника к электродам подводится ток I, который протекает через жидкий металл между полюсами электромагнита.

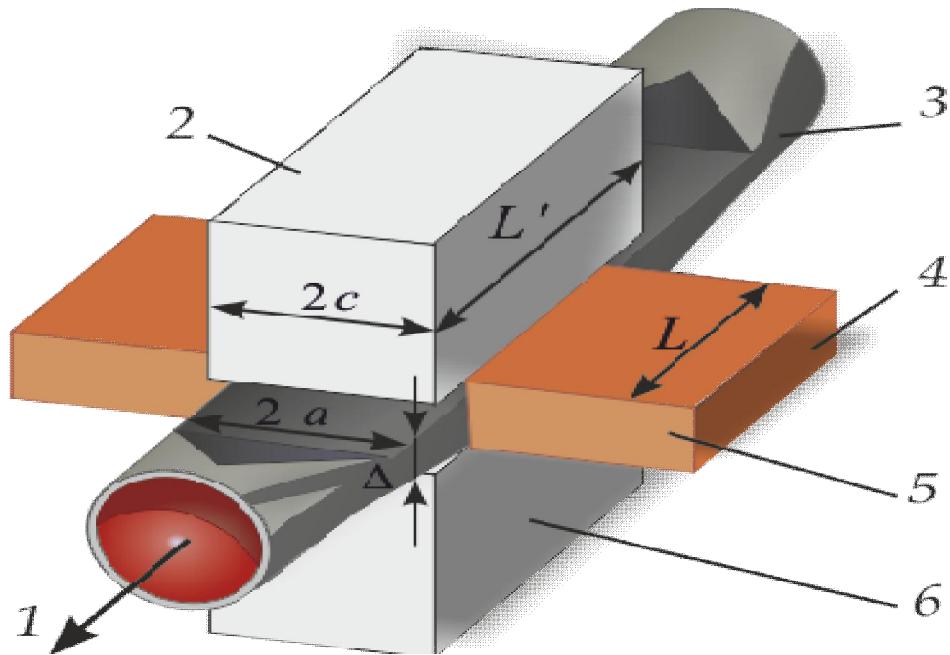


Рисунок 1 – Устройство кондукционного МГД-насоса

Между полюсами электромагнита 2 расположен канал с жидким металлом 1, к боковым граням которого приварены электроды 3. От внешнего источника к электродам подводится ток I , который протекает через жидкий металл между полюсами электромагнита.

Канал с жидким металлом 1, токоподводящие электроды 3 магнитные полюсы 2 расположены таким образом, чтобы направление векторов магнитной индукции B , плотности тока в жидком металле J и скорости движения металла v были взаимно перпендикулярными. В этом случае направление электромагнитной силы f^{EM} , по правилу левой руки, совпадает с осью канала.

Кондукционные МГД–насосы могут работать как на постоянных, так и переменных электрическом токе и магнитном поле. В любом случае магнитное поле неподвижно относительно стенок канала.

Электромагнитные насосы предназначены для транспорта жидких металлов по металлотрактам. Жидкий металл в насосах заключен в канале металлопровода и электромагнитные силы используются для создания напора разности давлений по концам активной зоны канала. Производительность насоса определяется расходом жидкого металла в единицу времени Q .

В насосном режиме знак тока совпадает со знаком напряжения, а в генераторном они противоположны.

Кондукционный МГД–насос может работать как на постоянном, так и на переменном токе при условии, что направлении электрического тока и магнитного поля изменяются одновременно.

Несмотря на то, что КПД кондукционного МГД–насоса переменного тока ниже, чем постоянного тока, они получили более значительное развитие. Это объясняется тем, что кондукционный насос требует питания от внешней цепи при значительных величинах тока (тысячи и десятки тысяч ампер) при низком

напряжении. Такие параметры электроэнергии легко достигаются при использовании понижающего трансформатора на переменном токе.

На практике не удается получить равномерное распределение электромагнитных сил в активной зоне по причине конечных геометрических размеров МГД-устройств и поверхностного эффекта токов в жидким металле.

В МГД-устройствах неравномерность распределения электромагнитных сил по оси (по направлению вектора магнитной индукции) принято называть толщинным краевым эффектом, а вдоль оси - поперечным краевым эффектом. Продольной осью насоса принято считать ось канала по длине канала, неравномерность электромагнитных сил по длине канала называется продольным краевым эффектом. Краевые эффекты оказывают существенное влияние на характеристики МГД-устройств.

Электромагнитные силы возникают в пределах активной зоны канала, имеющей размеры $2a\Delta L$, в которой существуют электрический ток плотностью J и магнитный поток плотностью B .

Активная зона является элементом всех трех цепей одновременно. Поэтому активную зону кондукционного МГД-насоса можно рассматривать как пересечение трех цепей: электрической, магнитной и гидравлической. Величина тока I в электрической цепи, а также величина плотности тока в активной зоне J зависят от величины электродвижущей силы e^M .

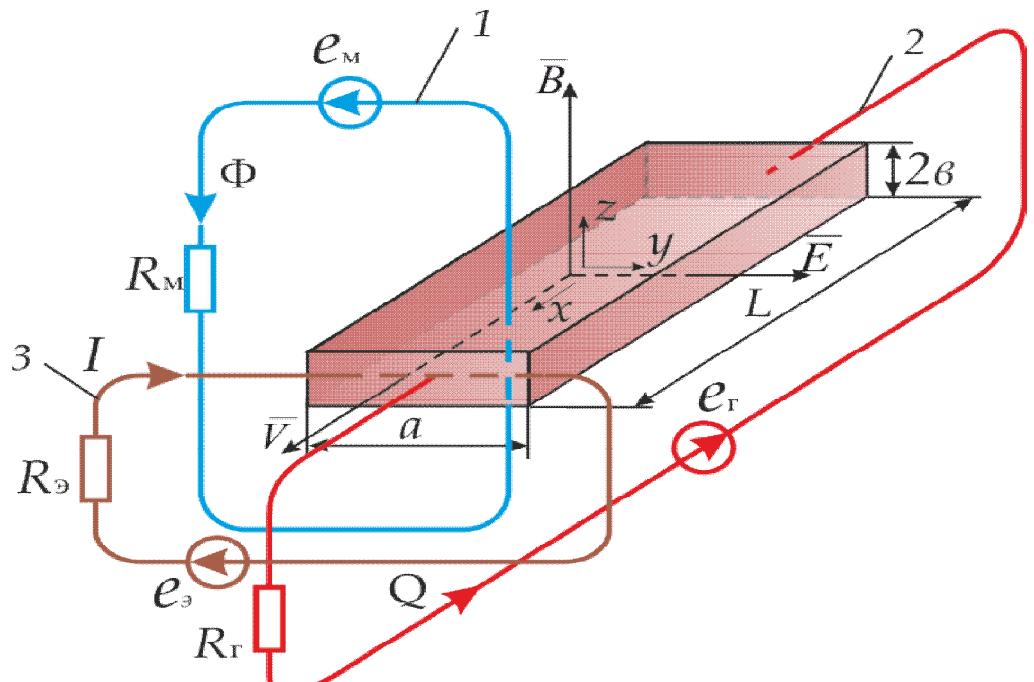


Рисунок 2 – Схема замещения электрической, магнитной и гидравлической цепей

Следовательно, кондукционный МГД-насос позволяет плавно управлять величиной электромагнитной силы f^{EM} в активной зоне и величиной расхода в канале Q .

1.3 Основные характеристики насосов

При перекачивании жидкого металла в канале насоса возникает противоэлектродвижущая сила, которая уменьшает плотность тока и величину развиваемого давления. На практике противоэлектродвижущая сила мало отражается на работе насоса, так как напряжение, приложенное к электродам составляет лишь небольшую часть напряжения питающего насос.

Вместе с тем при работе МГД-насоса проявляется явление, которое в классической теории электрических машин называется реакцией якоря. Электрический ток, протекающий через поперечное сечение канала, создает свое магнитное поле, которое усиливает магнитное поле электромагнита на входе в активную зону и ослабляет его на выходе. Давление, развиваемое кондукционным МГД-насосом постоянного тока с учетом реакции «якоря».

Как следует из представленного графика, при больших магнитных числах Рейнольдса реакция якоря может значительно уменьшить развиваемое насосом давление. Условие необходимости компенсации реакции якоря имеет вид

В кондукционных насосах, применяемых в атомной энергетике для перекачивания жидкometаллических теплоносителей, допускаются большие скорости u , а проводимость перекачиваемой среды сравнительно велика и соответственно велико магнитное число Рейнольдса. Поэтому компенсация реакции якоря в энергетических устройствах почти всегда целесообразна.

В МГД-устройствах metallургического назначения скорость движения жидкого металла меньше, ниже также электропроводность металла. По этой причине магнитное число Рейнольдса в МГД-устройствах metallургического назначения невелико, поэтому компенсация реакции якоря часто оказывается ненужной.

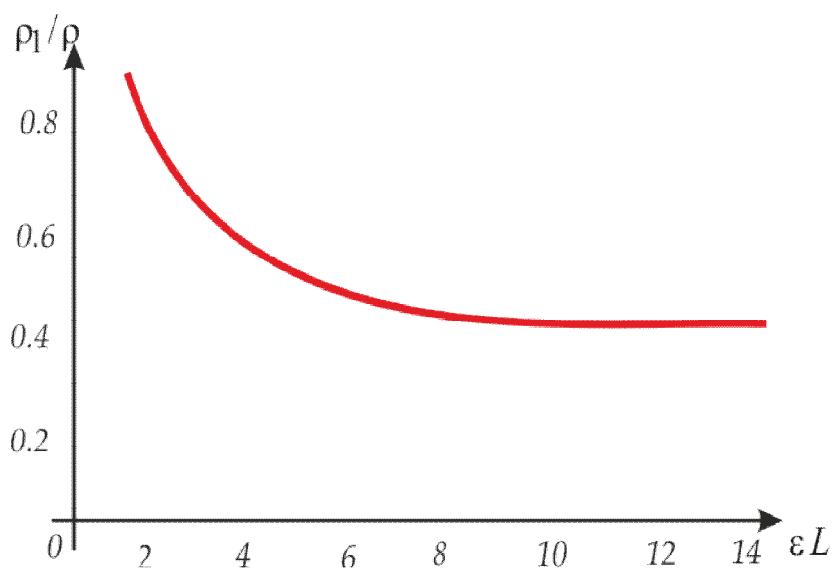


Рисунок 3 – Влияние реакции якоря на давление в кондукционном насосе

1.4 Основные виды МГД-насосов

Кондукционные установки обычно обозначаются номером входящего в их состав насоса (МДН-1, МДН-2 и т. д.). Как правило, в техническую марку кондукционной установки входит буква, обозначающая металл, для которого установка предназначена, и цифры, характеризующие ее основные параметры и конструктивные особенности. Например, МДН-6А-160 означает, что установка содержит насос МДН-6, предназначенный для алюминиевых сплавов и имеет полезную загрузку тигля 160 кг. Для промышленных установок используется также отраслевая индексация.

Все МГД-насосы делятся на две большие группы; индукционные и кондукционные.

В кондукционных МГД-насосах электрический ток I и магнитный поток Φ в активной зоне с жидким металлом создаются внешними независимыми электрической и магнитной цепями. Если канал с жидким металлом замкнут, то образуется также гидравлическая цепь с расходом жидкого металла Q , равного произведению средней скорости металла на сечение канала.

Основные преимущества магнитодинамического насоса:

- 1) Более высокий термический и гидродинамический КПД благодаря эффективной передаче энергии в жидкий металл замкнутой магнитной системой.
- 2) Малые размеры рабочей зоны за счет возможности получения в ней больших плотностей тока.
- 3) Возможность изготовления канала с относительно большой толщиной футеровки, что обеспечивает высокую стойкость канала.
- 4) Возможность гибкого управления процессами транспортировки и подогрева жидкого металла.
- 5) Более высокий общий коэффициент мощности индуктора ($\cos\phi=0.6-0.8$).
- 6) Простая, надежная и удобная для охлаждения, замены и ремонта конструкция обмоток.

Принцип действия индукционных МГД-насосов аналогичен асинхронным электрическим машинам. В этих устройствах электрические токи в рабочей зоне канала индуцируются бегущим магнитным полем, электрическая связь между расплавом и внешней электрической цепью отсутствуют и стенки каналов могут быть неэлектропроводящими. Рабочая зона индукционных МГД-насосов может иметь цилиндрическую или прямоугольную форму. Индукторы – источники бегущего магнитного поля так же выполняются цилиндрическими или плоскими. Плоские индукторы могут иметь два ферромагнитных сердечника, расположенных по обе стороны прямоугольного канала, или один сердечник, расположенный с одной стороны канала. В пазах сердечников расположена трехфазная или двухфазная обмотка, аналогичная обмоткам нормальных асинхронных машин.

1.5 Классификация кондукционных насосов

1.5.1 Кондукционные МГД-насосы переменного тока

Кондукционные насосы переменного тока получили более значительное развитие, несмотря на то, что КПД кондукционного МГД-насоса переменного тока ниже, чем постоянного тока. Это объясняется тем, что кондукционный насос требует питания от внешней цепи при значительных величинах тока(тысячи и десятки ампер) при низком напряжении. Такие параметры электроэнергии легко достигаются при использовании понижающего трансформатора на переменном токе. При питании насоса переменным током магнитная цепь его выполняется шихтованной, из листов электротехнической стали.

В МГД-устройствах неравномерность распределения электромагнитных сил по оси Z (по направлению вектора магнитной индукции) принято называть толщинным краевым эффектом, а вдоль оси Y – поперечным краевым эффектом. Продольной осью насоса принято считать ось канала по длине канала, неравномерность электромагнитных сил по длине канала называется продольным краевым эффектом. Краевые эффекты оказывают существенное влияние на характеристики МГД-устройств.

Рассмотрим некоторые конструкции кондукционных МГД-насосов трансформаторного типа. Комбинированный насос – трансформатор имеет разветвленную магнитную цепь, одна ветвь которой замкнута по железу, а другая имеет разрыв, в котором помещается канал насоса. На замкнутой ветви магнитной цепи наложены две обмотки:

- Первичная, предназначенная для включения в электросеть и имеет значительное число витков.
- Вторичная имеет лишь один или несколько витков, выполненных из шины большого сечения, концы которой приварены к каналу.

Интересной является конструкция кондукционного насоса трансформаторного типа с Ф-образной вторичной цепью и двумя активными зонами. Канал для транспортировки жидкого металла составляет вертикальную «палочку» буквы Ф, боковые «скобки» которой образованы приваренными к каналу шинами, пропущенными через окна сердечников двух отдельных трансформаторов. Магнитный поток, пронизывающий жидкий металл в активной зоне, создается отдельной разомкнутой магнитной системой.

Анализ различных типов кондукционных насосов показывает, что все они содержат рабочую зону только двух видов – тройниковую и крестообразную. В одном канале МГД-насоса может быть две и более рабочих зон, что позволяет осуществить одновременную подачу металла нескольким потребителям. Такая компоновка позволяет создать циркуляцию металла, в общем для них желобе, с целью интенсификации обработки металла между заливками; при заливке обе рабочие зоны работают параллельно.

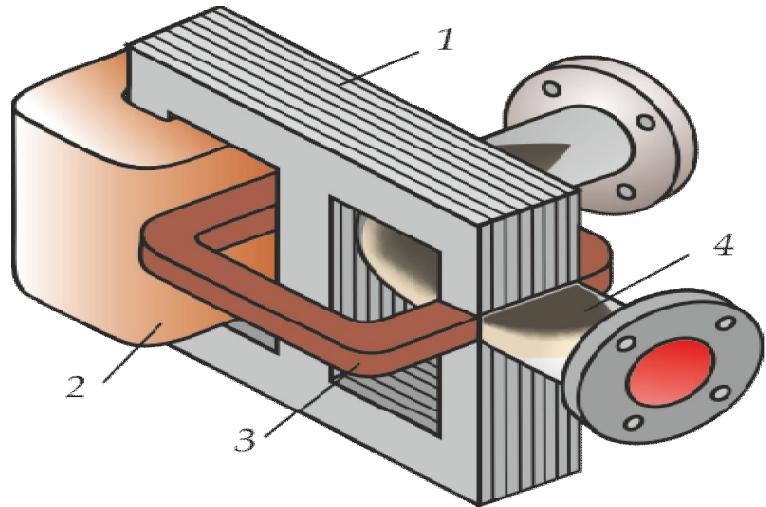


Рисунок 4 – Кондукционный насос трансформаторного типа: 1 – сердечник трансформатора; 2 – первичная обмотка трансформатора; 3 – вторичная обмотка, замкнутая на активную зону канала; 4 – канал с жидким металлом.

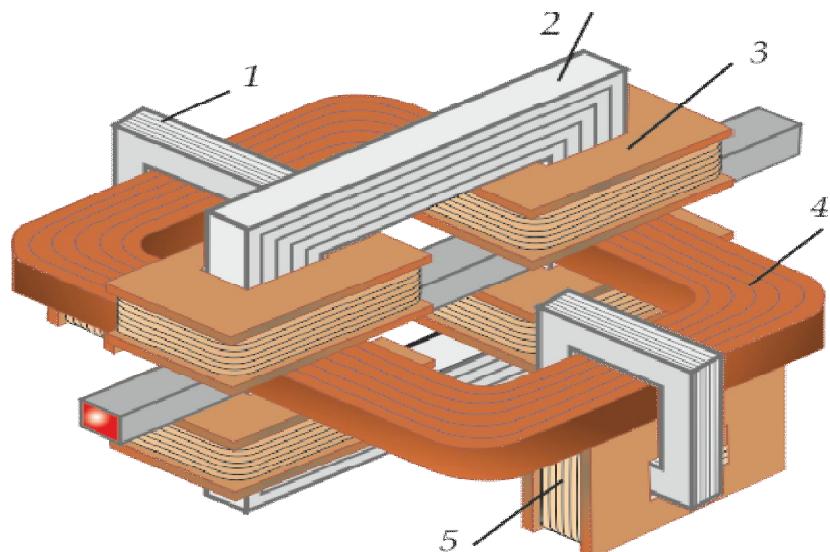


Рисунок 5 – Двухзонный кондукционный насос трансформаторного типа: 1 – сердечники трансформаторов; 2 – сердечники разомкнутой магнитной цепи; 3 – катушки разомкнутой магнитной цепи; 4 – токоподводы, замкнутые на канал – вторичные обмотки трансформаторов; 5 – первичные обмотки трансформаторов.

Кондукционные насосы и установки целесообразно рассматривать, группируя их по базовым конструкциям в соответствии с определяющими признаками их каналов и рабочих зон:

- МДН-3 – одновитковый канал с тройниковой рабочей зоной.
- МДН-13 – канал с прямоточными крестообразными рабочими зонами;
- МДН-6 – сдвоенный канал с тройниковой рабочей зоной;

1.5.2 Кондукционный насос с тройниками рабочими зонами и одновитковым каналом МДН-3

Базовой конструкцией для этой группы насосов является магнитодинамический насос (МДН) МДН-3.

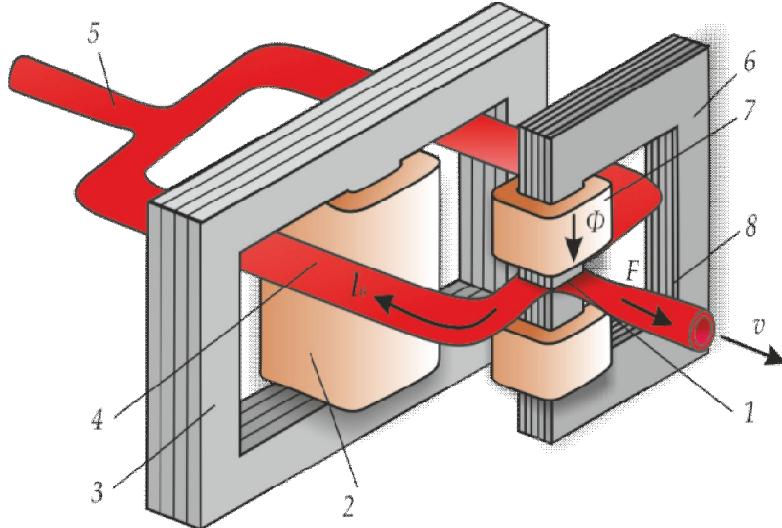


Рисунок 6 – Схема насоса МДН-3

Кольцевой трубопровод 2 охватывает центральный стержень замкнутого магнитопровода 3, набранного из листов трансформаторной стали, с расположенной на нем обмоткой 4, которая выполнена в виде катушки из изолированного провода. Этот трубопровод называется каналом МДН, а магнитопровод с катушкой-индуктором. Поскольку МДН предназначен для транспортировки жидкого металла, отдельные различающиеся по конструкции участки канала, а также подводящий и отводящий металл трубопроводы 5 и 8 называются в дальнейшем металлопроводами, а их совокупность, которая может включать и открытые элементы (желобы), металлотрактом. Расположенный в месте присоединения металлопровода 8 к каналу 4 участок 1, условными границами которого являются продолжения стенок металлопровода 8, называется рабочей зоной МДН. Такой узел соединения трубопроводов в гидравлике называется тройником, поэтому рабочая зона расположенная в месте присоединения к каналу МДН одного транспортного металлопровода, названа тройниковой рабочей зоной. Она находится в зазоре шихтованного магнитопровода 6 электромагнита, обмотка которого выполнена в виде двух катушек 7, размещенных по обе стороны от рабочей зоны.

Перед запуском устройства в тигель заливают жидкий металл для образования короткозамкнутого витка вокруг индуктора. При включении индуктора в сеть в витке индуцируется электрический ток, который подогревает металл в канале и тигле.

Слив металла осуществляется при включении питания электромагнита. В этом случае на ток в жидким металле накладывается магнитное поле. В металле

создается электромагнитная сила, под действием которой он приводится в движение. При сливе металла происходит уменьшение его уровня в тигле. Для компенсации уровня и исключения его влияния на величину дозы устройство поворачивается в вертикальной плоскости так, что уровень металла на выходе остается постоянным.

Благодаря повороту устройство в процессе периодической разливки металла значительно сокращаются энергетические затраты, так как в этом случае они ограничены лишь величиной электромагнитного напора, необходимого на выдачу одной порции металла с определенного уровня на сливе. Отсутствие металлопроводов для слива металла, расположенных непосредственно в жидком металле, позволяет повысить долговечность и надежность устройства, а также использовать его для разливки черных металлов.

1.5.3 Кондукционный насос с прямоточными крестообразными рабочими зонами МДН-13

Принцип действия заключается в том, что подвешенные к катушкам 3 переменные электрические токи создают в магнитопроводах 1 переменные магнитные потоки, которые индуцируют в жидким металле, образующим два короткозамкнутых витка, кольцевой ток I_2 . Если обмотка 3 имеет число витков W_1 , а вторичный виток жидкого металла с $W_1=1$, то из теории трансформаторов следует, что $I_2 \approx W_1 I_1$.

При питании обмоток 5 переменными токами I_3 (токи электромагнитов), в магнитопроводах 2 создаются пульсирующие магнитные потоки, направления индукций которых B_1 и B_2 в рабочих зонах показаны на рисунке знаками «+» и «-».

При взаимодействии электрического тока I_2 с магнитными потоками в жидким металле возникают объемные электромагнитные силы, направления которых определяются правилом левой руки: $f_1 = J_2 * B_1$; $f_2 = J_2 * B_2$; J_2 – плотность тока I_2 в рабочих зонах. Если ток в металле и магнитные поля изменяются по гармоническому закону, то электромагнитные силы f_1 и f_2 определяются выражением и содержат по две составляющих. Постоянные во времени составляющие создают гидравлический напор и обеспечивают транспортирование металла по каналу 6. По сравнению с другими МДН этот насос имеет оптимальные электрические и гидравлические характеристики.

Наиболее удобно его использовать в циркуляционных процессах. А также, такая конструкция МГД-устройства может использоваться в режиме транспортировки металла (режим насоса) или сдерживания внешнего напора (режим тормоза).

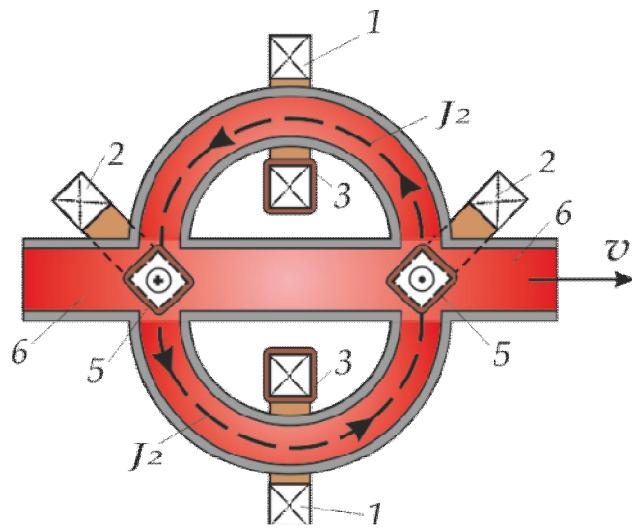


Рисунок 7 – Схема насоса МДН-13

1.5.4 Кондукционный насос типа МДН-6

Кондукционный насос со сдвоенным каналом и тройниковой рабочей зоной.

Базовой конструкцией для этой группы кондукционных насосов является установка МДН-6.

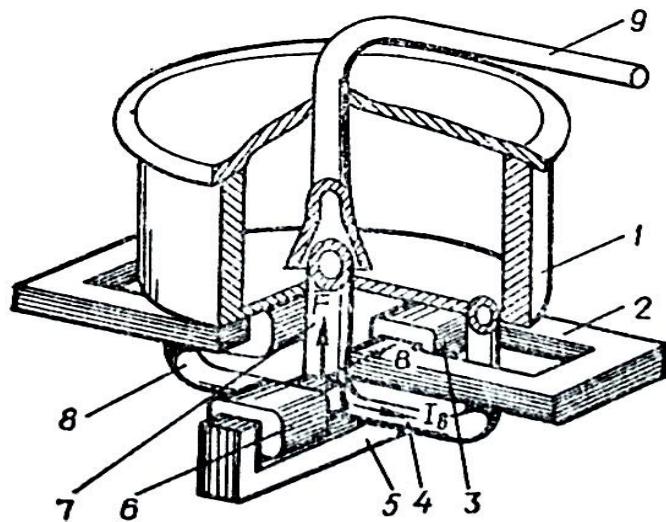


Рисунок 8 – Схема насоса МДН-6

Тигель 1 установки в донной части сообщается с каналом, состоящим из боковых 4, 8 и центрального 7 металлопроводов. К устью последнего присоединен сливной металлопровод 9. Участок соединения металлопроводов 4, 7, 8 расположен в зазоре магнитопровода 5 электромагнита, обмотки 6 которого размещены по обе стороны рабочей зоны. Магнитопроводы 2 двух индукторов охватывают боковые металлопроводы, а их обмотки 3 расположены в окнах канала.

По технологическим возможностям установка МДН-6 не имеет равных среди МГД-установок других типов, так как она позволяет создать режимы течения металла различающиеся направлением, абсолютным и относительной величинами скоростей и давлений в каждом металлопроводе канала, общей подведенной тепловой мощностью и подогревом металла на различных участках канала, чем объясняется ее применение при плавке, рафинировании, заливке, дозировании и литье под электромагнитным давлением цветных сплавов.

При оценке МДН-6 нельзя упускать из виду некоторые ее недостатки по сравнению с насосами первой группы. МДН-6 имеет более сложный канал. Это обуславливает увеличение тепловых потерь, снижение термического и электрического КПД, уменьшение термической стойкости канала. Нижнее по отношению к ванне расположение рабочей зоны обусловливает максимальный металlostатический напор в ней. Это препятствует возникновению разрежения в рабочей зоне, но ухудшает условия работы футеровки, особенно для тяжелых металлов. Расположение металлопровода внутри ванны облегчает подогрев металла в нем между заливками, но возникают затруднения с подбором материалов, стойких при двустороннем контакте с высокотемпературными сплавами.

Установка обеспечивает поддержание заданного гидродинамического режима перемешивания металла в тигле и разливку металла с плавным регулированием расхода в пределах 0,3-3 кг/сек.

Опробовано автоматическое порционное дозирование металла по времени(точность 4-7%) и объему (точность 1,5-2%).

1.5.5 МГД-насос «Пуш-пул»

Насос типа «Пуш-пул» — это безобмоточный насос наружного расположения и состоит из двух секций однотипных последовательно соединенных МГД насосов: тянувшего и толкающего насосов. Насос работает на физическом принципе, насосный эффект возникает в результате взаимодействия тока в плоском канале с собственным магнитным полем, которое усиливается ферромагнитным П-образным сердечником. При этом возникают объёмные силы, втягивающие металл в канал. Сердечники ориентированы относительно канала таким образом, что давления, развиваемое каждой секцией, суммируется.

Насос типа «Пуш-пул» не имеет шин токоподвода, что упрощает конструкцию и повышает её надёжность. Ток в насосе наводится индукционным способом от специального трансформатора, где канал насоса является вторичной обмоткой трансформатора. Производительность насоса зависит от тока в канале, который может достигать до 6 кА и более, и её можно менять, регулируя напряжение на первичной обмотке трансформатора.

Были проведены стендовые испытания насоса на галлиевом сплаве и заводские испытания на жидком магнии. Получена напорно-расходная

характеристика при рабочих токах в канале 2, 3 и 4 кА. Физическая модель насоса имела ферромагнитные сердечники с немагнитным зазором 18мм, внешнюю толщину канала под сердечниками 16 мм, внутреннюю толщину канала 8мм. Канал изготовлен из немагнитной нержавеющей трубы диаметром 42 мм. Насос развивал расход до 8 тонн жидкого магния в час при подъёме металла на высоту до 1 метра. При нулевом расходе (стопорный режим) насос способен поднять магний на высоту до 6 метров (давление около 1 атмосферы). Полученные результаты имеют хорошее совпадение с расчётами.

Испытания и расчёты показали, что насос развивает давление и расход, удовлетворяющие потребностям литейного производства. Его можно успешно применять в установках подачи магния на литейный конвейер и для литья крупногабаритных слитков. При этом наблюдается некоторое улучшение качества разливаемого металла. Кроме того, эксплуатация в условиях реального производства показала, что насос надёжен и лёгок в обслуживании.



Рисунок 9 – МГД-насос «Пуш-пул»

1.6 Обзор используемых в современной металлургии кондукционных МГД-насосов

Патент №2281834 Способ разливки магния и установка для его осуществления

Авторы патента: Кулинский Анатолий Илларионович, Артеев Андрей Иванович, Елин Сергей Михайлович

Изобретение относится к металлургии, в частности к разливке магния. Установка содержит кондукционный электромагнитный насос, миксер, подающую трубу, установленную в миксере и соединенную с насосом. В миксере размещена камера, жестко присоединенная к подающей трубе. В камере выполнено отверстие для установки трубы, один конец которой соединен с камерой, а другой - с источником подачи газа. После разогрева активной зоны насоса осуществляют подачу магния в активную зону из

миксера по подающей трубе путем периодической подачи газа в камеру и разливают магний в литейные формы. Соотношение объема камеры и объема подающей трубы, равное 3:1, позволяет создавать подъемную силу и обеспечить быстрый запуск насоса. Достигается повышение производительности устройства и снижение затрат.

Установка состоит из миксера и насоса погружного типа, активная зона которого постоянно находится ниже уровня металла в миксере. Насос установлен в металлический кожух для исключения контакта узлов насоса с магнием. В кожухе размещены медные шины, магнитопровод.

Недостатком работы такой установки и способа является то, что шины для подвода тока, размещенные в расплавленном магнии, быстро выходят из строя из-за окисления, что приводит к большим материальным затратам и низкому сроку службы установки и производительности способа.

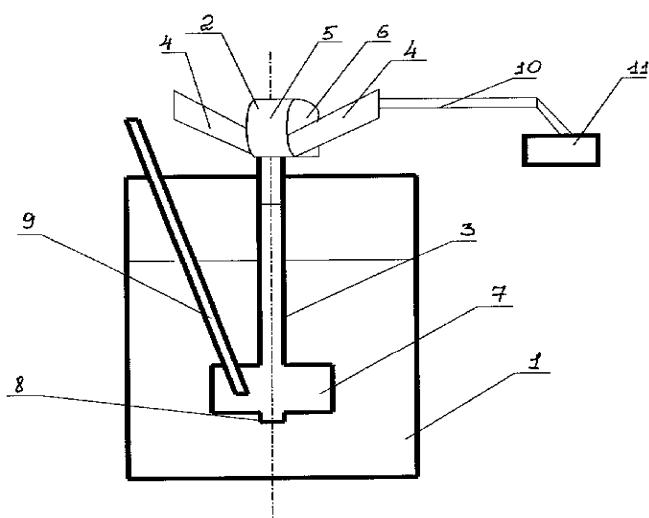


Рисунок 10 – Установка для разливки цветных металлов: 1 – миксер; 2 – насос; 3 – подающая труба; 4 – выходные патрубки; 5 – магнитопровод; 6 – активная зона; 7 – камера; 8 – отверстие, установленное на подающей трубе 3; 9 – труба для подачи газа; 10 – транспортирующая труба; 11 – литейные формы.

Пример работы устройства:

Подачу жидкого металла в активную зону насоса - каналы 4 осуществляют следующим образом:

На миксер 1 с расплавленным магнием устанавливают кондукционный электромагнитный насос 2, а подающую трубу 3 с камерой 7 с отверстием 8 размещают в миксере 1, при этом камера 7 полностью опущена в расплавленный магний. В камере 7 выполнено отверстие для установки трубы 9, другая часть трубы 9 подсоединенна к системе подачи сжатого воздуха или к баллону с инертным газом. Соотношение объема камеры к объему подающей трубы равно 3:1. Для разогрева деталей подающей трубы 3 и транспортирующей трубы 10 подают напряжение ~30 В и создают переменный ток ~1,5 кА. Затем прогревают активную зону 6 с выходными патрубками 4 насоса 2 до температуры 700-750°C, подавая на него напряжение от основного

источника переменного тока $U=2-3$ В, $I=4-8$ кА. Затем оба источника тока отключают и в камеру 7 подают через трубу 9 газ, например сжатый воздух или инертный газ. Газ, подаваемый под давлением, разделяется на две части, большая часть поступает в подающую трубу 3 и подает магний в активную зону 6 насоса 2, другая часть выходит через отверстие 8. При заполнении активной зоны 6 подачу газа прекращают, включают снова ток и магний под действием электромагнитной силы Лоренса устремляется в транспортирующую трубу 10 и литейные формы 11, насос включился в работу.

Таким образом, данная группа изобретений позволит устраниить недостатки прототипа и повысить производительность работы установки, повысить безопасность работы насоса, а также обеспечить непрерывную разливку магния в литейные формы.

Патент №200441 Электромагнитный кондукционный насос
Авторы патента: Беляев Б.М., Маркович М.М., Сорокин Ю.И.

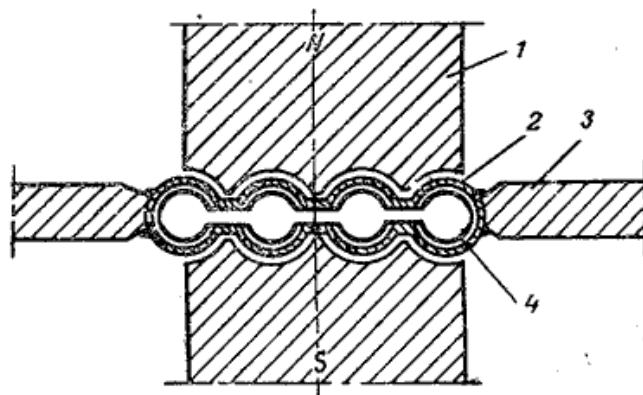


Рисунок 11 – Электромагнитный кондукционный насос:
1 – магнитопровод; 2 – канал; 3 – токопроводящие шины(приваренные к каналу);
4 – электрическая изоляция

Известные электромагнитные кондукционные насосы состоят из магнитопровода и токопроводящих шин. Канал в насосе покрыт внутри электрической изоляцией.

Предлагаемый кондукционный насос отличается от известных тем, что канал выполнен гофрированным, в направлении, перпендикулярном направлению тока. Это позволяет уменьшить обходной ток, протекающий по стенкам канала. Гофрированная форма канала увеличивает и повышает сопротивление стенок. Обходной ток, протекающий по стенкам канала, уменьшается.

Форма полюсных наконечников магнитопровода повторяет форму канала. Чтобы уменьшить потери на перемешивание жидкого металла, возникающие из-за неравномерного распределения электромагнитных сил по сечению канала, зубцы необходимо выполнять возможно чаще.

Патент №1442 Кондукционный насос

Авторы патента: Наганов А. В., Герасименко С. С., Васильев Н. И., Мельник В. И.

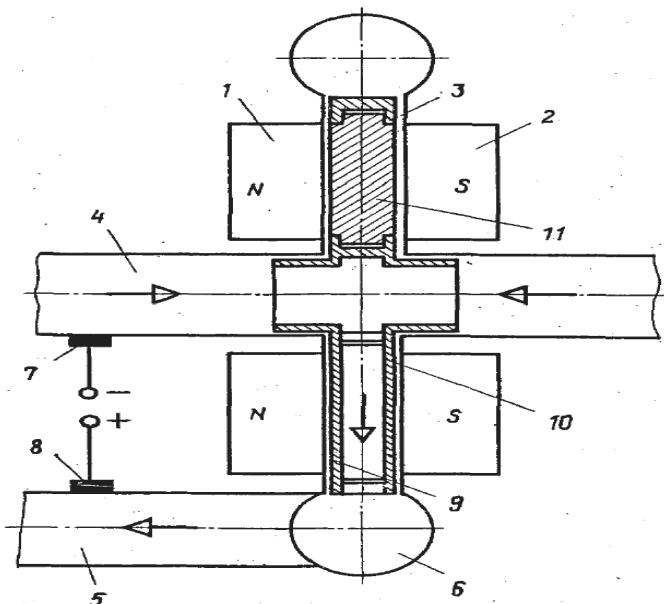


Рисунок 12 – Кондукционный насос

Изобретение относится к области электромагнитных насосов для перекачивания электропроводных сред, например жидких металлов. Целью изобретения является расширение технологических возможностей насоса.

На чертеже схематично изображен предлагаемый насос в разрезе. В верхней части разреза сечение изображено проходящим по телу лопаток и перемычек, скрепляющих диски колеса, зазор между ними показан увеличенным, канал для прохода жидкости условно показан в одну линию.

Кондукционный насос содержит электромагнит с полюсными наконечниками 1 и 2, которые выполнены кольцевыми. В зазоре между ними размещен дисковый канал 3 для прохода перекачиваемой жидкости с подводящим трубопроводом 4 и с отводящим трубопроводом 5. Отводящий трубопровод 5 показан в плоскости рисунка условно и подключен к кольцевому отводящему коллектору 6, охватывающему выход из канала 3. Токоподводящие электроды 7 и 8 установлены на подводящем 4 и отводящем 5 трубопроводах. В канале 3 для прохода жидкости установлено с возможностью вращения колесо, образованное дисками 9 и 10, между которыми установлены радиальные лопатки 11. Лопатки 11 выполнены с диэлектрическим покрытием и установлены в прорезях дисков, как показано на чертеже. Насос работает следующим образом: при подаче напряжения на электроды 7, 8 и на обмотку электромагнита (на чертеже не показана), в зазоре между полюсным наконечниками 1 и 2 создается магнитное поле и через электропроводную жидкость, а также через диски 9, 10 течет ток. Взаимодействие тока и магнитного потока вызывает усилие в направлении, перпендикулярном направлению тока и магнитных линий, т.е. при радиальном направлении тока

возникает окружное усилие, приводящее во вращение электропроводную жидкость и диски 9, 10. При удельной электропроводности материала дисков 9 и 10 большей, чем у перекачиваемой жидкости, большая часть тока проходит через них, и возникающее в дисках окружное усилие передается с помощью лопаток 11. Раскрученная в канале 3 жидкость под действием центробежных сил перекачивается из подводящего 4 трубопровода в кольцевой отвод би далее отводящий трубопровод 5, создавая напор насоса. Развиваемый напор зависит от скорости жидкости на выходе из канала 3 в кольцевой отвод 6, т.е. от окружной скоростиколеса, образованного дисками 9, 10 и лопатками 11. В общем случае угловая скорость жидкости колеса в канале 3 зависит от развивающегося момента вращения, магнитного потока и плотности тока. Регулируя магнитный поток и плотность тока, получают заданный момент вращения и, соответственно, угловую скорость колеса и напор колеса. При этом появляется возможность получить заданный напор при перекачивании жидкостей с различной электропроводностью что расширяет технологические возможности насоса. При движении электропроводного тела в магнитном поле в нем индуцируются электрические токи. При вращении жидкости и колеса в магнитном поле, образованном наконечниками 1 и 2, в жидкости и в дисках 9, 10 возникают индуцированные токи, направленные по окружности. Так как лопатки 11 выполнены с диэлектрическим покрытием, проводящее сечение для кольцевых индуцированных токов перекрывается до величины суммарного зазора между колесом и каналом 3, что приводит к уменьшению величины их токов и связанных с ними потерь.

Патент №3837763 Кондукционный насос

Авторы патента: Карбонель А., Эртауд А., Паносян Ж.

Кондукционный насос простой конструкции для жидкого металла, включающий в себя катушки помещенные в огнеупорный корпус и канал потока жидкого металла, присоединенного к корпусу двумя наконечниками, каждый из которых содержит по крайней мере одно отверстие.

Электромагнитный кондукционный насос включает в себя вертикальный канал 1 для потока жидкого металла, из огнеупорного материала проходящего в воздушном зазоре 2 замкнутого магнитопровода 3. Магнитопровод соединен с обмоткой 4 расположенной в верхней части магнитопровода 3 и наматывается на одну из его сторон. На обмотку 4 подают переменный ток для наведения, в сечении жидкого металла, расположенного в воздушном зазоре 2, горизонтального магнитного поля. Воздушный зазор расположен в нижней части магнитопровода 3.

Насос включает в себя, кроме того, вторичную магнитную цепь в виде магнитопровода 5, питание обмотки 6, расположенной в верхней части магнитопровода 5 и наматывающуюся на одну из его сторон, и проводящую катушку 7 с прямоугольным поперечным сечением вокруг одной из вертикальных сторон магнитопровода 5.

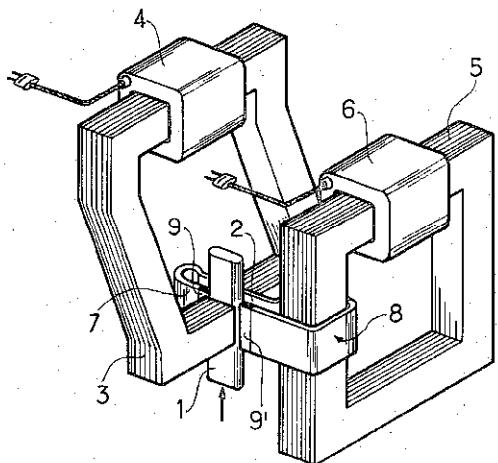


Рисунок 13 – Общий вид насоса

На обмотку 6 подается переменный ток, таким образом, что бы индуцировать переменный ток в проводящей катушке 7. Средняя горизонтальная плоскость катушки 7 состоит из огнеупорного корпуса 8 с жидким металлом. Корпус 8 подключен к каналу 1, две концевые части 9, 9' каждой из которых проходит с внутренней стороны корпуса 8 и соединяются с внутренней стороны канала 1, так что металл может течь между корпусом 8 и каналом 1. Сечение металла расположено между наконечниками 9, 9' имеет переменный ток, генерируемый в катушке 7, проходящий через нее.

Катушка 7 устроена так, что постоянный ток, протекающий между концами частей 9 и 9' были перпендикулярны магнитному полю, создаваемому в воздушном зазоре 2, и к оси канала 1. Наконечники 9 и 9' расположенные по обе стороны канала 1, находящиеся в воздушном зазоре 2, корпус 8 содержит плоскую часть расположенную в той же части канала и так же находящуюся в зазоре 2. Шпиль 7 расположен на значительно более низком уровне, чем обмотки 4 и 6, так что бы эти обмотки были расположены значительно выше ванны жидкого металла, когда катушка 7, а так же часть канала 1 расположенной ниже катушки, погружено в ванну металла. Таким образом можно защитить обмотки 4 и 6 от случайного роста температуры, который сделает нормальную работу насоса невозможной.

1.7 Вывод

На основе вышеперечисленной информации в процессе работы необходимо исследовать возможность повышения тепловой эффективности МГД-насоса одновиткового типа за счёт оптимизации теплоизоляции различных частей металлопровода в зависимости от их условий работ.

2 Электрический расчет

2.1 Расчет индуктора с каналом

Полная мощность, подводимая к индуктору:

$$S_u = \frac{P_u}{\cos j_c}. \quad (2.1)$$

Сечение сердечника магнитопровода:

$$S_u = C_m \cdot \sqrt{\frac{S_u \cdot \Psi}{f \cdot B_c \cdot \delta_u}}, \quad (2.2)$$

где $C_m = 0,275$ – коэффициент формы для стержневого однофазного магнитопровода;

$\Psi = 50$ - отношение массы стали G_c к массе меди $G_{\text{мед}}$ индуктора при воздушном охлаждении;

$\delta_u = (2 \div 4) \text{ МА/м}^2$ – плотность тока в индукторе при воздушном охлаждении;

$B_c = 1 \text{ Тл}$ - магнитная индукция в магнитопроводе из стали 1511.

Сечение сердечника с учетом межлистовой изоляции:

$$S'_c = \frac{S_c}{k_c}, \quad (2.3)$$

где $k_c = 0,9$ - коэффициент заполнения.

Диаметр окружности, описанной вокруг ступенчатого стержня:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_c}{\pi \cdot k_d}}, \quad (2.4)$$

где $k_d = 0,81$ – коэффициент заполнения сердечником окружности при числе ступени, равном трем.

Число витков индуктора:

$$w_u' = \frac{U_u}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot S_c}. \quad (2.5)$$

Сила тока в индукторе:

$$I_u = \frac{S_u}{U_u}. \quad (2.6)$$

Расчетная плотность тока в индукторе:

$$J = \frac{I_u}{S_{np}}. \quad (2.7)$$

Глубина проникновения тока в материал индуктора:

$$\Delta_i = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_i}{f}}, \quad (2.8)$$

где $\rho_i = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м - удельное сопротивление меди.

Число витков индуктора:

$$w_u = \frac{I_b}{I_u}. \quad (2.9)$$

Толщину изоляции между витками принимаем $2 \cdot b_{iz}$.

Тогда высота индуктора:

$$h_u = (h_b + 2 \cdot b_{iz}) \cdot w_u, \quad (2.10)$$

где $h_b = 0,005$ м - осевой размер провода.

Внутренний диаметр индуктора (по меди):

$$D_1 = d_c + 2 \cdot a + 2 \cdot b_{iz}. \quad (2.11)$$

Средний диаметр индуктора:

$$D_{cp,1} = D_1 + b_1. \quad (2.12)$$

Активное сопротивление индуктора:

$$r_1 = \frac{1,15 \cdot \rho_u \cdot w_u \cdot \pi \cdot D_{cp,1}}{S_{np}}. \quad (2.13)$$

Электрические потери в индукторе:

$$P_{\text{э.и.}} = I_u^2 \cdot r_l . \quad (2.14)$$

Масса меди индуктора:

$$G_{\text{мед}} = S_{\text{пр}} \cdot W_u \cdot \pi \cdot D_{\text{ср.1}} \cdot d_m , \quad (2.15)$$

где $d_m = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ - плотность меди.

Масса стали магнитопровода:

$$G_c = \Psi \cdot G_{\text{мед}} . \quad (2.16)$$

Электрические потери в стали магнитопровода:

$$P_{\text{э.с.}} = p_c \cdot G_c , \quad (2.17)$$

где $p_c = 0,58 \text{ Вт/кг}$ - удельные потери в стали при индукции $B = 1 \text{ Тл.}$

Полные электрические потери в стали и меди индуктора с сердечником:

$$P_{\text{э.п.}} = P_{\text{э.и.}} + P_{\text{э.с.}} . \quad (2.18)$$

Сечение канала:

$$S_k = \frac{I_b}{\delta_k} , \quad (2.19)$$

где δ_k - плотность тока в канале.

Глубина проникновения тока в жидкий алюминий в канале:

$$\Delta_k = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{Al}}}{f}} . \quad (2.20)$$

Активная мощность, выделяемая в канале:

$$P_k = P_u - P_{\text{э.п.}} . \quad (2.21)$$

Активное сопротивление канала:

$$r_k = \frac{P_k}{I_b^2} . \quad (2.22)$$

Активная длина канала:

$$l_k = \frac{r_k \cdot S_k}{\rho_{Al} \cdot K_{n.e.}}, \quad (2.23)$$

где $K_{n.e.} = 0,5$ – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение переменного тока по сечению канала.

Индуктивное сопротивление системы “индуктор-канал”, приведенное к первичной обмотке (индуктору):

$$X = \frac{4 \cdot f \cdot w_u^2 \cdot S_\Delta \cdot K_R \cdot K_a \cdot 10^{-6}}{h_1}, \quad (2.24)$$

где K_R - коэффициент Роговского;

$$K_R = 1 - \frac{l_{on} + l_b + l_3}{\pi \cdot h_a}, \quad (2.25)$$

K_a – коэффициент, учитывающий влияние на рассеяние магнитного поля разности высот обмотки и канала;

$$K_a = 1 + \frac{h_u - l_b}{3,5 \cdot h_u} \cdot \left[1 + \frac{\pi}{3} \cdot \frac{h_u - l_b}{l_b + \frac{1}{3} \cdot (l_{on} + l_b)} \right], \quad (2.26)$$

S_Δ - площадь приведенного зазора между витком и индуктором;

$$S_\Delta = S_3 + \frac{S_{ou} + S_k}{3}, \quad (2.27)$$

S_3 - площадь поперечного сечения зазора между индуктором и каналом, m^2 ;

S_{ou} – площадь поперечного сечения индуктора, m^2 ;

S_k - площадь поперечного сечения канала, m^2 .

Активное сопротивление канала (фактическое), приведенное к индуктору:

$$r' = r_k \cdot w_u^2. \quad (2.28)$$

Активное сопротивление системы “индуктор-канал”:

$$r = r_k + r'. \quad (2.29)$$

Полное сопротивление системы “индуктор-канал”:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (2.30)$$

Электрический к.п.д. системы:

$$\eta_{эл} = \frac{P_k}{P_k + P_{э.п.}}. \quad (2.31)$$

Естественный коэффициент мощности системы:

$$\cos\phi_c = \frac{r}{c}. \quad (2.32)$$

2.2 Расчет электромагнита

При воздействии в рабочей зоне тока I_b с рабочим магнитным потоком Φ_p в металле возникают объемные электромагнитные силы:

$$F_e = J \cdot B, \quad (2.33)$$

где $J = I_b / 4 \cdot a \cdot b$ - плотность тока;

$B = \Phi_p / 4 \cdot l \cdot a$ – индукция.

Это приводит к тому, что между точками I и II возникает перепад давления p_e , равный отношению интегральной электромагнитной силы F_e к площади выходного сечения рабочей зоны:

$$p_e = 2 \cdot j \cdot B \cdot l \cdot \cos\Psi. \quad (2.34)$$

Одновременно, зная массовый расход металла G_m , сечение выходного канала S_k , можно оценить напор (давление) его на выходе к отливке:

$$p_k = \frac{G_m}{S_k}. \quad (2.35)$$

Принимаем $p_k = p_e$, находим:

$$B = \frac{p_e}{2 \cdot J \cdot l \cdot \cos\Psi} = \frac{p_e}{2 \cdot \frac{I_b}{4 \cdot a \cdot b} \cdot l \cdot \cos\Psi}. \quad (2.36)$$

В рабочей зоне магнитная индукция B представляет собой сумму индукций, создаваемых индуктором B_u и электромагнитом B_e : $B = B_u + B_e$,

Откуда:

$$B_3 = B - B_u, \quad (2.37)$$

где $B_u = \frac{\Phi_u}{S_c}$;

Φ_u – магнитный поток, создаваемый индуктором:

$$\Phi_u = \frac{\omega_u \cdot I_u \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot S_c}{l_m}, \quad (2.38)$$

$\mu = 500 \div 5000 \text{ Гн/м}$ - магнитная проницаемость сердечника;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнитная проницаемость провода катушки;

$l_m = 1,5 \text{ м}$ - длина магнитного пути сердечника.

Рабочий магнитный поток электромагнита:

$$\Phi_{\text{раб.}} = B_3 \cdot S_6, \quad (2.39)$$

где S_6 - площадь зазора между полюсами электромагнита.

2.3 Выводы по разделу

Данная инженерная методика была применена для расчёта кондукционного МГД-насоса трансформаторного типа с однокольцевой формой канала. В результате были определены геометрические размеры окон магнитопровода, размеры катушки и, что необходимо для ведения теплового расчёта, допустимые зазоры между металлопроводом и катушкой, между металлопроводом и магнитопроводом. Имея данные размеры можно выполнить подбор теплоизоляции для той или иной части металлопровода, что и будет сделано в следующих частях работы.

[изъят 1 абзац]

3 Тепловой расчет

[изъят 1 абзац]

3.1 Расчет под и вне индуктора с обмазкой 17 и 10 мм

3.1.1 МГДН КТ-10. Футеровка канала вне области под индуктором

Толщина футеровки канала. Канал под индуктором. Футеровка канала - легкий бетон Пиротек с плотностью=600кг/м³. Аналог пеношамот

$$b_1 := 0.017.$$

Вычисляем коэффициент теплопередачи α_2

$$\alpha_2 := 18.7.$$

Температура на поверхности трубы, темная

$$t_4 := 172.$$

Вычисляем плотность теплового потока $q \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$

$$t_5 := 45;$$

$$q_3 := \alpha_2 (t_4 - t_5);$$

$$q_3 = 2.375 \cdot 10^3.$$

Температура расплава свинца, омывающего футеровку трубы, 0С

$$t_0 := 490.$$

Определяем суммарное термическое сопротивление теплопроводности ограждения(м²·К)/Вт

$$r_0 := \frac{(t_0 - t_4)}{q_3};$$

$$r_0 = 0.134.$$

Перепад температуры между расплавом свинца и воздухом

Принимаем температуру на границе футеровка-суперсил

$$t_{11} := 290.$$

Определяем среднюю температуру футеровки

$$t_{01} := 0.5 \cdot (t_0 + t_{11});$$

$$t_{01} = 390.$$

Теплопроводность футеровки канала

$$\lambda_1 \cdot 0.15 + 0.128 \cdot \frac{t_{01}}{1000};$$

$$\lambda_1 = 0.2.$$

Вычисляем тепловое сопротивление футеровки

$$r_1 := \frac{b_1}{\lambda_1};$$

$$r_1 = 0.085;$$

$$r_{11} := r_0 - r_1;$$

$$r_{11} = 0.049.$$

Определяем действительную температуру на границе футеровки и суперсил

$$t_1 := t_0 - q_3 \cdot r_1;$$

$$t_1 = 288.053.$$

Вычисляем относительную погрешность в определении температуры

$$\varepsilon := 0.02;$$

$$\varepsilon_1 := \frac{(t_1 - t_{11})}{t_1};$$

$$\varepsilon_1 = -6.76 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем среднюю температуру суперсила(аналог каол. картона)

$$t_{21} := 170;$$

$$t_{12} := 0.5 \cdot (t_1 + t_{21});$$

$$t_{12} = 229.026.$$

Определяем теплопроводность суперсила

$$A_2 := 0.058;$$

$$\Gamma_2 := 0.186;$$

$$\lambda_2 \cdot A_2 + \Gamma_2 \cdot \frac{t_{12}}{1000};$$

$$\lambda_2 = 0.101.$$

Вычисляем тепловое сопротивление суперсила

Толщина суперсила

$$b_{20} := 0.005.$$

Тепловое сопротивление суперсила

$$r_{20} := \frac{b_{20}}{\lambda_2};$$

$$r_{20} = 0.05;$$

$$r_{12} := r_{11} - r_{20};$$

$$r_{12} = -8.36 \cdot 10^{-4}.$$

Определяем действительную температуру на поверхности суперсила

$$t_2 \cdot t_1 - q_3 \cdot r_{20};$$

$$t_2 = 170.015;$$

$$\varepsilon_2 \cdot \frac{(t_2 - t_{21})}{t_2};$$

$$\varepsilon_2 = 8.62 \cdot 10^{-5}.$$

Определяем суммарную толщину ограждения

$$b_0 := b_1 + b_{20};$$

$$b_0 = 0.022.$$

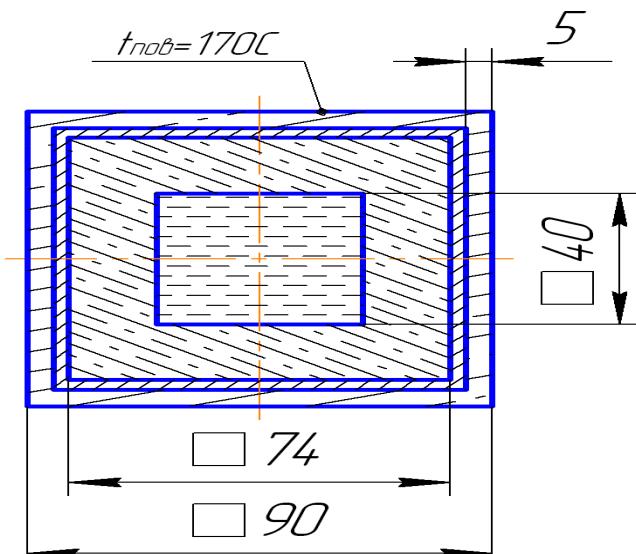


Рисунок 14 – Металлопровод под индуктором

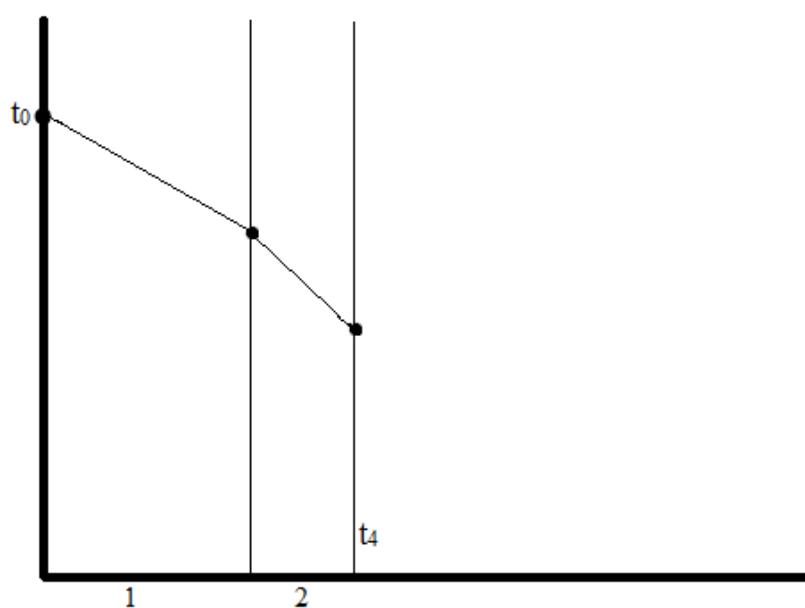


Рисунок 15 – График распределения температуры

3.1.2 МГДН КТ-10. Футеровка канала в области вне индуктора

Толщина футеровки канала. Канал под индуктором. Футеровка канала - легкий бетон Пиротек с плотностью=600кг/м³. Аналог пеношамот

$$b_1 := 0.017.$$

Вычисляем коэффициент теплопередачи α_2

$$\alpha_2 := 15.$$

Температура на поверхности трубы, темная

$$t_4 := 104.$$

Вычисляем плотность теплового потока $q \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$

$$t_5 := 20;$$

$$q_3 := \alpha_2(t_4 - t_5);$$

$$q_3 = 1.26 \cdot 10^3.$$

Температура расплава свинца, омывающего футеровку трубы, 0С

$$t_0 := 490.$$

Определяем суммарное термическое сопротивление теплопроводности ограждения(м²·К)/Вт

$$r_0 := \frac{(t_0 - t_4)}{q_3};$$

$$r_0 = 0.306.$$

Перепад температуры между расплавом свинца и воздухом
Принимаем температуру на границе футеровка-суперсил

$$t_{11} := 386.$$

Определяем среднюю температуру футеровки

$$t_{01} := 0.5 \cdot (t_0 + t_{11});$$

$$t_{01} = 438.$$

Теплопроводность футеровки канала

$$\lambda_1 := 0.15 + 0.128 \cdot \frac{t_{01}}{1000};$$

$$\lambda_1 = 0.206.$$

Вычисляем тепловое сопротивление футеровки

$$r_1 := \frac{b_1}{\lambda_1};$$

$$r_1 = 0.082;$$

$$r_{11} := r_0 - r_1;$$

$$r_{11} = 0.224.$$

Определяем действительную температуру на границе футеровки и суперсил

$$t_1 := t_0 - q_3 \cdot r_1;$$

$$t_1 = 386.052.$$

Вычисляем относительную погрешность в определении температуры

$$\varepsilon := 0.02;$$

$$\varepsilon_1 \cdot \frac{(t_1 - t_{11})}{t_1};$$

$$\varepsilon_1 = 1.34 \cdot 10^{-4}.$$

Определяем среднюю температуру суперсила(аналог каол. картона)

$$t_{21} := 106;$$

$$t_{12} \cdot 0.5 \cdot (t_1 + t_{21});$$

$$t_{12} = 246.026.$$

Определяем теплопроводность суперсила

$$A_2 := 0.058;$$

$$\Gamma_2 := 0.186;$$

$$\lambda_2 := A_2 + \Gamma_2 \cdot \frac{t_{12}}{1000};$$

$$\lambda_2 = 0.104.$$

Вычисляем тепловое сопротивление суперсила
Толщина суперсила

$$b_{20} := 0.023.$$

Тепловое сопротивление суперсила

$$r_{20} := \frac{b_{20}}{\lambda_2};$$

$$r_{20} = 0.222;$$

$$r_{12} := r_{11} - r_{20};$$

$$r_{12} = 2.187 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем действительную температуру на поверхности суперсила

$$t_2 := t_1 - q_3 \cdot r_{20};$$

$$t_2 = 106.756;$$

$$\varepsilon_2 := \frac{(t_2 - t_{21})}{t_2};$$

$$\varepsilon_2 = 7.077 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем суммарную толщину ограждения

$$b_0 := b_1 + b_{20};$$

$$b_0 = 0.04.$$

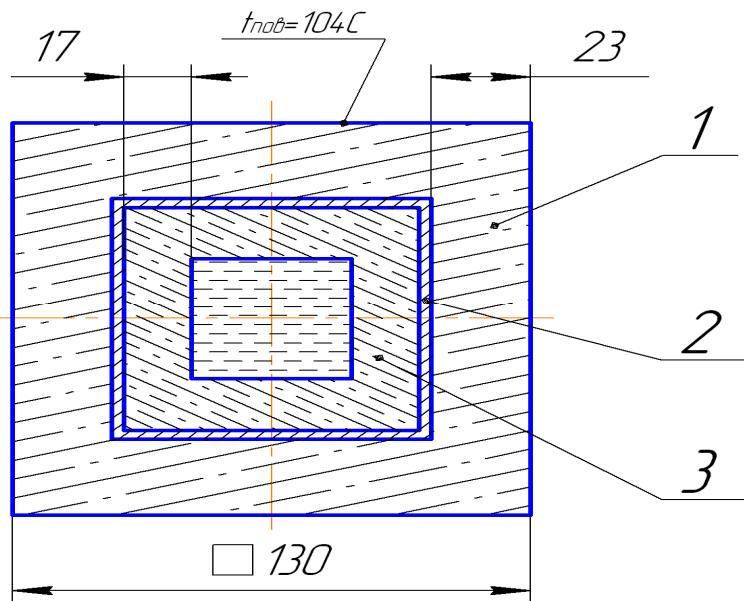


Рисунок 16 – Металлопровод вне индуктора

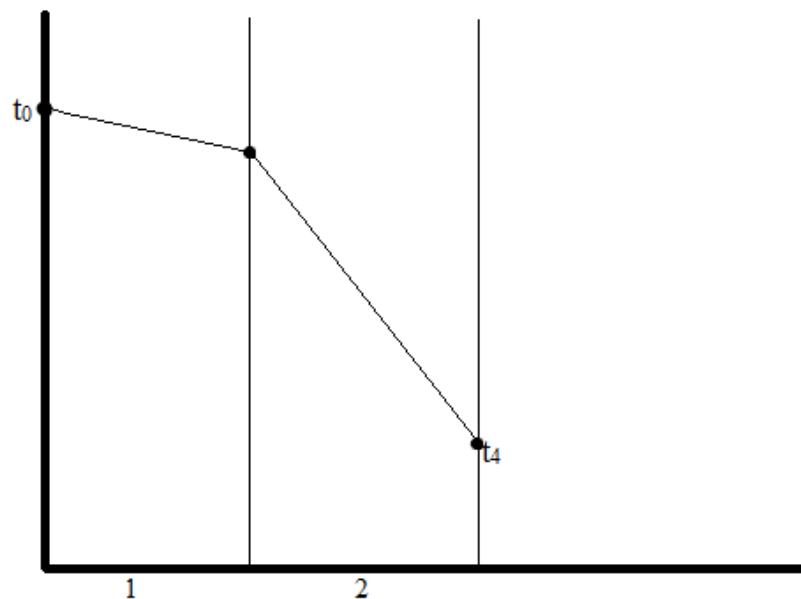


Рисунок 17 – График распределения температуры

3.1.3 МГДН КТ-10. Футеровка канала в области под индуктором

Толщина футеровки канала. Канал под индуктором. Футеровка канала - легкий бетон Пиротек с плотностью=600кг/м³. Аналог пенополистирола

$$b_1 := 0.01.$$

Вычисляем коэффициент теплопередачи α_2

$$\alpha_2 := 17.2.$$

Температура на поверхности трубы, темная

$$t_4 := 171.$$

Вычисляем плотность теплового потока $q \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$

$$t_5 := 40;$$

$$q_3 := \alpha_2(t_4 - t_5);$$

$$q_3 = 2.253 \cdot 10^3.$$

Температура расплава свинца, омывающего футеровку трубы, 0С

$$t_0 := 490.$$

Определяем суммарное термическое сопротивление теплопроводности ограждения(м²·К)/Вт

$$r_0 := \frac{(t_0 - t_4)}{q_3};$$

$$r_0 = 0.142.$$

Перепад температуры между расплавом свинца и воздухом
Принимаем температуру на границе футеровка-суперсилик

$$t_{11} := 380.4.$$

Определяем среднюю температуру футеровки

$$t_{01} := 0.5 \cdot (t_0 + t_{11});$$

$$t_{01} = 435.2.$$

Теплопроводность футеровки канала

$$\lambda_1 := 0.15 + 0.128 \cdot \frac{t_{01}}{1000};$$

$$\lambda_1 = 0.206.$$

Вычисляем тепловое сопротивление футеровки

$$r_1 := \frac{b_1}{\lambda_1};$$

$$r_1 = 0.049;$$

$$r_{11} := r_0 - r_1;$$

$$r_{11} = 0.093.$$

Определяем действительную температуру на границе футеровки и суперсил

$$t_1 := t_0 - q_3 \cdot r_1;$$

$$t_1 = 380.465.$$

Вычисляем относительную погрешность в определении температуры

$$\varepsilon := 0.02;$$

$$\varepsilon_1 := \frac{(t_1 - t_{11})}{t_1};$$

$$\varepsilon_1 = 1.704 \cdot 10^{-4}.$$

Определяем среднюю температуру суперсила(аналог каол. картона)

$$t_{21} := 175;$$

$$t_{12} := 0.5 \cdot (t_1 + t_{21});$$

$$t_{12} = 277.732.$$

Определяем теплопроводность суперсила

$$A_2 := 0.058;$$

$$\Gamma_2 := 0.186;$$

$$\lambda_2 := A_2 + \Gamma_2 \cdot \frac{t_{12}}{1000};$$

$$\lambda_2 = 0.11.$$

Вычисляем тепловое сопротивление суперсила
Толщина суперсила

$$b_{20} := 0.01.$$

Тепловое сопротивление суперсила

$$r_{20} := \frac{b_{20}}{\lambda_2};$$

$$r_{20} = 0.091;$$

$$r_{12} := r_{11} - r_{20};$$

$$r_{12} = 1.771 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем действительную температуру на поверхности суперсила

$$t_2 := t_1 - q_3 \cdot r_{20};$$

$$t_2 = 174.99;$$

$$\varepsilon_2 := \frac{(t_2 - t_{21})}{t_2};$$

$$\varepsilon_2 = -5.69 \cdot 10^{-5}.$$

Определяем суммарную толщину ограждения

$$b_0 := b_1 + b_{20};$$

$$b_0 = 0.02.$$

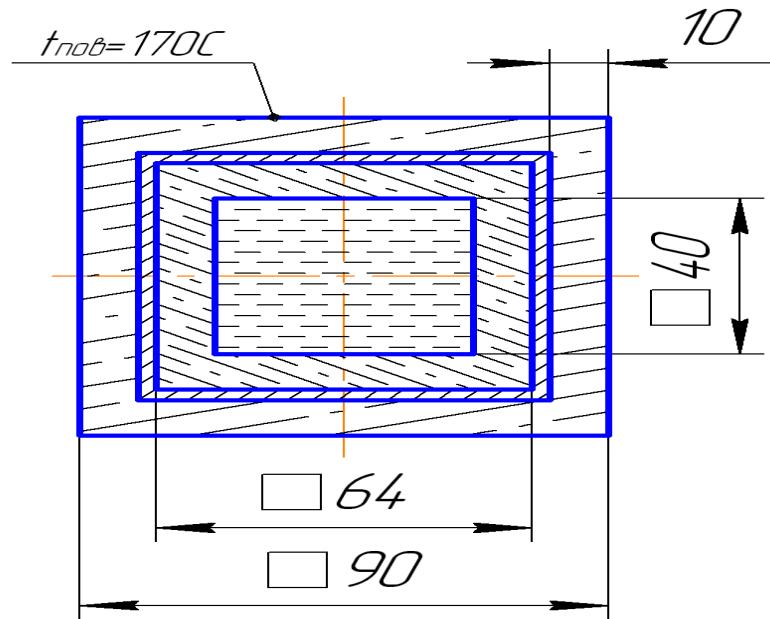


Рисунок 18 – Металлопровод под индуктором



Рисунок 19 – График распределения температуры

3.1.4 МГДН КТ-10. Футеровка канала вне области вне индуктора

Толщина футеровки канала. Канал под индуктором. Футеровка канала - легкий бетон Пиротек с плотностью=600 кг/м³. Аналог пеношамот

$$b_i := 0.01.$$

Вычисляем коэффициент теплопередачи α_2

$$\alpha_2 := 20.$$

Температура на поверхности трубы, темная

$$t_4 := 79.$$

Вычисляем плотность теплового потока $q \cdot \text{Вт}/\text{м}^2$

$$t_5 := 20;$$

$$q_3 := \alpha_2(t_4 - t_5);$$

$$q_3 = 1.185 \cdot 10^3.$$

Температура расплава свинца, омывающего футеровку трубы, 0С

$$t_0 := 490.$$

Определяем суммарное термическое сопротивление теплопроводности ограждения(м²·К)/Вт

$$r_0 := \frac{(t_0 - t_4)}{q_3};$$

$$r_0 = 0.33.$$

Перепад температуры между расплавом свинца и воздухом
Принимаем температуру на границе футеровка-суперсил

$$t_{11} := 433.$$

Определяем среднюю температуру футеровки

$$t_{01} := 0.5 \cdot (t_0 + t_{11});$$

$$t_{01} = 461.5.$$

Теплопроводность футеровки канала

$$\lambda_1 := 0.15 + 0.128 \cdot \frac{t_{01}}{1000};$$

$$\lambda_1 = 0.209.$$

Вычисляем тепловое сопротивление футеровки

$$r_1 := \frac{b_1}{\lambda_1};$$

$$r_1 = 0.048;$$

$$r_{11} := r_0 - r_1;$$

$$r_{11} = 0.282.$$

Определяем действительную температуру на границе футеровки и суперсил

$$t_1 := t_0 - q_3 \cdot r_1;$$

$$t_1 = 433.321.$$

Вычисляем относительную погрешность в определении температуры

$$\varepsilon := 0.02;$$

$$\varepsilon_1 := \frac{(t_1 - t_{11})}{t_1};$$

$$\varepsilon_1 = 7407 \cdot 10^{-4}.$$

Определяем среднюю температуру суперсила(аналог каол. картона)

$$t_{21} := 105;$$

$$t_{12} := 0.5 \cdot (t_1 + t_{21});$$

$$t_{12} = 269.16.$$

Определяем теплопроводность суперсила

$$A_2 := 0.058;$$

$$B_2 := 0.186;$$

$$\lambda_2 := A_2 + B_2 \cdot \frac{t_{12}}{1000};$$

$$\lambda_2 = 0.108.$$

Вычисляем тепловое сопротивление суперсила
Толщина суперсила

$$b_{20} := 0.03.$$

Тепловое сопротивление суперсила

$$r_{20} := \frac{b_{20}}{\lambda_2};$$

$$r_{20} = 0.278;$$

$$r_{12} := r_{11} - r_{20};$$

$$r_{12} = 4515 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем действительную температуру на поверхности суперсила

$$t_2 := t_1 - q_3 \cdot r_{20};$$

$$t_2 = 104.349;$$

$$\varepsilon_2 := \frac{(t_2 - t_{21})}{t_2};$$

$$\varepsilon_2 = -6.241 \cdot 10^{-3}.$$

Определяем суммарную толщину ограждения

$$b_0 := b_1 + b_{20};$$

$$b_0 = 0.04.$$

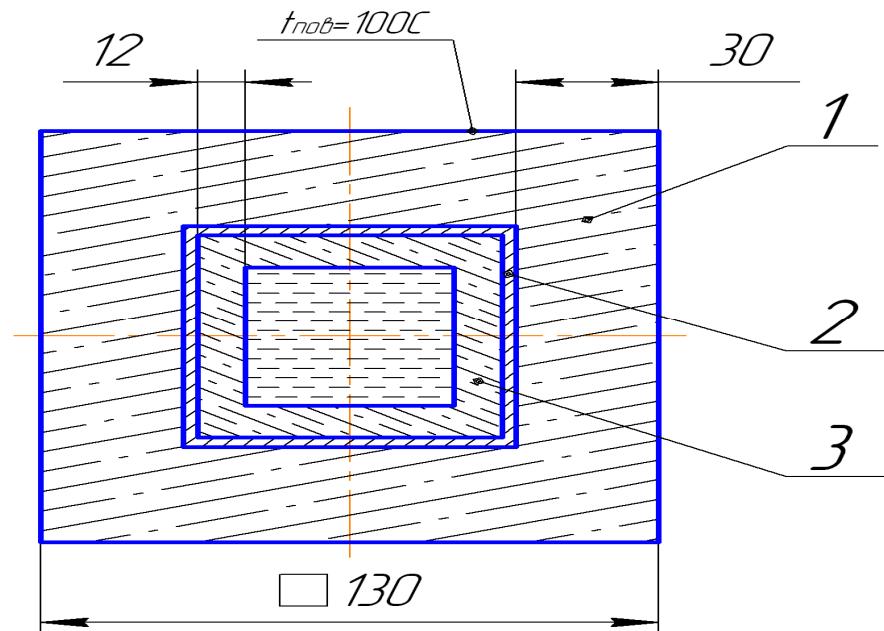


Рисунок 20 – Металлопровод вне индуктора



Рисунок 21 – График распределения температуры

3.1.5 Выводы по разделу

[изъят 1 абзац]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

[изъята 1 страница]

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кирко И.В. Магнитная гидродинамика при экстремальных процессах / И.В. Кирко, Г.Е. Кирко. М.: «Наука», 1982. – 135 с.
2. Полищук, В.П. Магнитогидродинамические насосы для жидких металлов / В.П. Полищук, Цин М.Р., Горн Р.К. и др. Киев: Наук. думка, 1989. – 256с.
3. Верте Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла / Л.А. Верте. М.: Металлургия, 1967. – 208с.
4. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкокометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. Л.: Энергия, 1970. – 272с.
5. Круминь, Ю.К. Технология электромагнитного транспортирования легких металлов / Ю.К. Круминь, Мищенко В.Д., Микельсон А.Э. М.: Металлургия, 1980. – 128с.
6. Тимофеев, В.Н. МГД технологии в металлургии / В.Н. Тимофеев, Е.А. Павлов, М.В. Первухин, С.П. Тимофеев, М.Ю. Хацаюк // МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс специализация IV. – Санкт-Петербург; изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 250 с.
7. Свенчанский, А. Д. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. П. Евтюкова, Л. С. Кацевич. – М.: «Энергоиздат», 1982. – 400 с.
8. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов, Г.Н. Васильченко, С.В. Даниленко, А.Я. Карнацкий, И.Л. Шилович, М.Ф. Боженко; под общ. ред. Б.С. Громова – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 1998. – 256 с.