

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

Политехнический институт

Электротехнологии и электротехники

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.Н. Тимофеев

подпись      инициалы, фамилия

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016г.

## **МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

МГД–УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ, ДОЗИРОВАНИЯ  
И ПОДОГРЕВА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

13.04.02.07 Электротехнологии в металлургии

Руководитель	_____	<u>к.т.н, доцент</u>	<u>Д.А. Михайлов</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>Д.В. Снитков</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа магистерской диссертации по теме  
МГД–УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ, ДОЗИРОВАНИЯ  
И ПОДОГРЕВА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Консультанты по  
разделам:

1.Магнитогидродинамические  
устройства для перекачивания  
жидких металлов

\_\_\_\_\_

В. Н. Тимофеев  
инициалы, фамилия

2.1. Физическое моделирование  
одновиткового МГДН  
трансформаторного типа

\_\_\_\_\_

В. Д. Раков  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

М.В. Первухин  
инициалы, фамилия

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	6
1 Магнитогидродинамические устройства для перекачивания жидких металлов	8
1.1 Применение МГД – устройств.....	8
1.2 Электромагнитный лоток.....	9
1.3 Термоэлектрические насосы.....	10
1.4 Насос с вращающимся магнитным полем.....	10
1.5 Насос на постоянных магнитах .....	11
1.6 Кондукционные насосы .....	11
1.6.1 Кондукционный насос постоянного тока.....	12
1.6.2 Кондукционный насос переменного тока .....	14
1.6.3 Кондукционные насосы металлургического назначения .....	15
1.7 Выводы по главе.....	19
2 Физическая и математическая модель одновиткового насоса трансформаторного типа. Моделирование процесса транспортирования жидкого металла.....	21
2.1 Расчет, конструирование и изготовление одновиткового МГДН трансформаторного типа.....	21
2.1.1 Канальная часть.....	21
2.1.2 Основной трансформатор .....	23
2.1.3 Электромагнит.....	24
2.2. Проведение экспериментов на физической модели МГДН.....	29
2.2.1 Трансформатор с короткозамкнутым витком .....	29
2.2.2 Определение КПД трансформатора .....	29
2.2.3 Определение тока трансформатора в зависимости от нагрузки.....	30
2.2.4 Сдвиг фаз тока и напряжения трансформатора и основной катушки	30
2.2.5 Эксперимент с определением сдвига фаз тока в основной катушке $I_1$ и тока в канале $I_k$ на физической модели .....	31
2.2.6 Последовательное включение основного трансформатора и электромагнита на холостом ходу без металла в металлопроводе.....	32
2.2.7 Увеличения тока в цепи с помощью подключения ёмкости.....	32
2.2.8 Последовательное включение основного трансформатора с нагрузкой в виде канала заполненного металлом и электромагнита. ....	33
2.2.9 Определение влияния сдвига фаз тока в основной катушке $I_1$ и тока в катушке электромагнита $I_2$ на перепад давления в канале насоса .....	34
2.2.10 Проведение тепловых испытаний на физической модели МГДН.....	35
2.3 Выводы по главе.....	35

3 Математическое моделирование однофазного МГДН трансформаторного типа .....	36
3.1 Постановка задачи и основные допущения .....	36
3.2 Задание нагрузок в математической модели .....	40
3.3 Сравнение результатов математического и физического моделирования насоса трансформаторного типа.....	42
3.4 Выводы по главе.....	42
4 Рекомендации .....	43
Заключение .....	44
Список использованных источников .....	45

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «МГД–устройство транспортирования, дозирования и подогрева жидких металлов» содержит 60 страниц текстового документа, 50 иллюстраций, 7 таблиц, 69 формул и 32 использованных источника.

**МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ НАСОС, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА, МЕТАЛЛУРГИЯ.**

Объектом исследования является МГД – насос трансформаторного типа с каналом из нержавеющей стали и электромагнитом.

Цель магистерской диссертации - исследование электромагнитных процессов, протекающих в расплаве перекачиваемого металла.

В результате изготовлена физическая модель МГДН, проведены испытания и получены характеристики зависимости создаваемого давления от разности фаз и величин токов.

В результате математического моделирования определены оптимальные параметры насоса для получения максимального воздействия на металл.

На основе анализа результатов выданы рекомендации по изготовлению промышленного образца МГДН.

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность.** В настоящее время на металлургических заводах в процессе плавильно-литейного производства сплавов цветных металлов существует потребность в сравнительно простых и надежных устройствах для перекачивания расплава металлов из стационарных печей в литейные машины и установки. Данная задача решается путем использования поворотных гидравлических печей, но их стоимость в разы больше стационарных, так же требуется большая высота цеха для их установки. С другой стороны, задачу автоматизированного перекачивания металла можно решить с помощью МГД – устройств. Кондукционные МГД – насосы дозаторы позволяют получить относительно большие электромагнитные давления в небольших рабочих зонах. Электромагнитные характеристики кондукционных МГД – насосов позволяют полностью автоматизировать процесс транспортирования, дозирования и подогрева расплава металла.

**Объект исследования.** Кондукционный МГД – насос трансформаторного типа с каналом из нержавеющей стали и электромагнитом.

**Предмет исследования.** Электромагнитные процессы, протекающие в различных узлах насоса.

**Цель работы.** Провести исследование электромагнитных процессов кондукционного МГД – насоса трансформаторного типа для получения оптимальных параметров с целью улучшения энергетических и силовых характеристик и выдачи рекомендаций для создания промышленного образца.

### **Задачи:**

1. Разработка конструкции физической модели;
2. Изготовление физической модели;
3. Разработка математической модели;
4. Проведение экспериментов на физической и математической модели;
5. Проведение анализа полученных данных;
6. Выдача рекомендаций по конструкции МГДН для получения наилучших электротехнических характеристик и усилий.

**Научная новизна и значимость работы.** Получены новые зависимости влияния расположения электромагнита, сдвига фаз токов и их изменение на возникающие усилия в жидком металле кондукционного МГД – насоса трансформаторного типа.

**Методы исследования.** Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики. При разработке численной модели применялся метод конечных элементов (МКО) для решения задачи электродинамики в программной среде Ansys.

### **Практическая значимость.**

[изъят 1 абзац]

**Апробация работы.** Основные положения и научные результаты работы докладывались, обсуждались на следующих конференциях:

1. I международная научно-техническая конференция (Пермь, 2015).

2. X Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященная 80-летию образования Красноярского края.

3. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных.

# **1 Магнитогидродинамические устройства для перекачивания жидких металлов**

## **1.1 Применение МГД – устройств**

На стыке гидродинамики и электродинамики зародилась и стремительно развивается новая область науки – магнитная гидродинамика, изучающая движение жидкой электропроводящей среды при наличии магнитного поля. В качестве электропроводящей среды в металлургии выступают жидкие металлы и их сплавы. Технические приложения магнитной гидродинамики в металлургии рассматривают не только движение жидкого металла в магнитном поле, но и различные закономерности электромагнитного силового воздействия на металлические расплавы [1].

В настоящее время магнитогидродинамические устройства и технологии управления потоками проводящих жидкостей получили широкое распространение в различных областях техники. Одним из технологических процессов при получении алюминиевых сплавов, стабильность которого определяет качество этих сплавов, является процесс доставки расплава металла до конвейеров и кристаллизаторов литейных машин. Поэтому металлурги пытаются наладить автоматизацию и механизацию этого процесса, что на практике очень трудно достичь. Существуют механические способы дозированной подачи металла, однако они недостаточно надежны либо требуют привлечения участия человека.

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 расплава металла из стационарных миксеров. Магнитогидродинамическое устройство (МДУ) должно преимущественно соответствовать заданным требованиям порасход-напорным характеристикам, а также по условиям работы, прежде всего, с точки зрения нагрева обмотки индуктора [2].

Также МДУ нашли свое широкое применение в перспективном направлении-термоядерной энергетике России. В термоядерных реакторах теплоносителем (жидкометаллическим рабочим телом) является жидкий щелочной металл: натрий, сплав натрий-калий, литий; или свинец и его сплавы. Свинец, как рабочее тело, весьма перспективен для различных ионно-плазменных установок, для повышения безопасности и надежности которых, как правило, требуется бесконтактное воздействие на рабочее тело, достаточно просто реализуемое магнитогидродинамическими насосами (МГДН).

Требование к МГД – технике включает в себя разработку конструкций высоконадежных МГД – машин и устройств в диапазоне расходов рабочих тел от единиц кубических миллиметров до нескольких кубических метров в секунду:



1. устройств, предназначенных для эксплуатации при воздействии высокой температуры, ионизирующего излучения, и, в то же время, стойких к воздействию вибрационных нагрузок, возникающих, в частности, в результате землетрясений;

2. разработку принципиальных решений конструкций МГД – каналов и материалов для них, обеспечивающих требуемый ресурс;

3. выбор окружающей МГД–технику газовой среды;

4. исследование и разработку материалов обмоток, не содержащих не образующих в процессе эксплуатации, из-за терморadiационного воздействия и диффузионных процессов, агрессивных, электропроводящих, ионизируемых элементов и материалов.

Решение отмеченных выше задач в настоящее время реализуется в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова с участием отечественных и зарубежных специалистов, предприятий и организаций[3].

Все МГД–насосы делятся на две большие группы: индукционные и кондукционные.

В кондукционных МГД–насосах рабочая зона является местом пересечения независимых электрической и магнитной цепей. Поэтому в рабочей зоне таких устройств можно получить относительно большие значения плотности тока  $J$  и магнитной индукции  $B$ . Кондукционные МГД–насосы могут работать как на постоянном, так и переменном электрическом токе.

## 1.2 Электромагнитный лоток

Электромагнитный лоток считается одним из простых МГД– устройств, в котором используется бесконтактное силовое воздействие магнитного поля на расплавленный металл. Их особенность состоит в разомкнутой конструкции магнитопровода, вследствие краевыми эффектами, обусловленными спецификой электромагнитных процессов. Разомкнутый магнитопровод магнитной цепи является причиной отклонения от синусоидальной формы магнитного потока в зазоре между магнитопроводом и расплавом, по причине чего возникает снижение эффективности преобразования энергии [4].

Устройство ЭМЛ показано на рисунке 1. Устройство состоит из магнитопровода 2, в пазах которого расположена многофазная обмотка 3, индуктор размещен под каналом 1 с расплавленным металлом 4. Сторону индуктора, расположенную под каналом называют активной. Расстояние от поверхности индуктора до расплава принято называть рабочим зазором. Чем больше величина рабочего зазора, тем меньше магнитное поле проникает в расплав. Условно можно считать, что индуктор представляет собой аналог развернутого статора асинхронного двигателя.

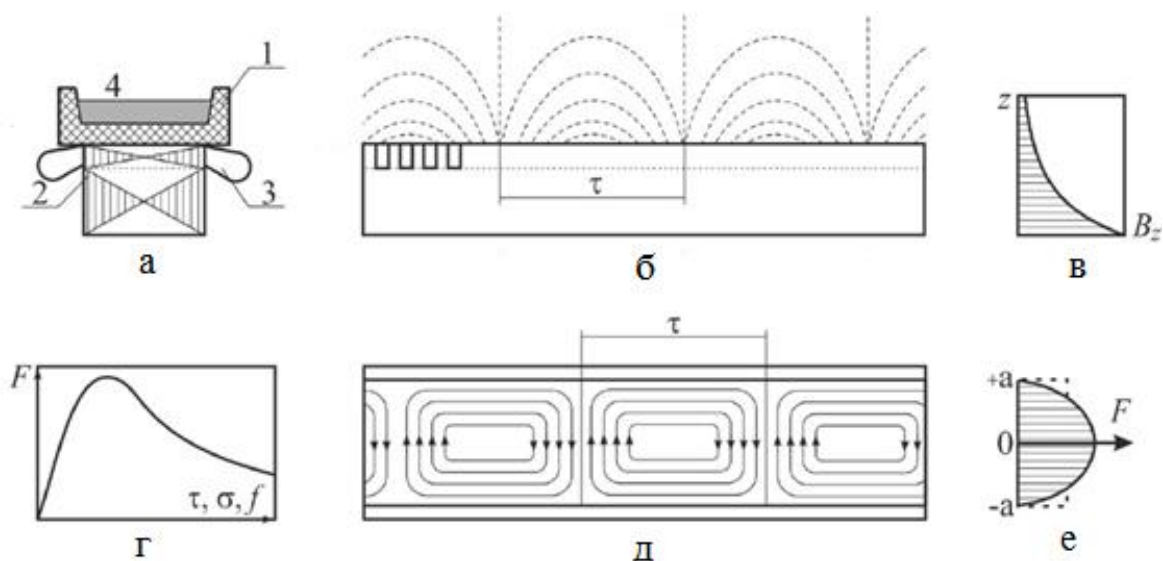


Рисунок 1 – Электромагнитный лоток: а – вид сбоку; б – продольный разрез; в – затухание нормальной составляющей магнитной индукции  $B_z$  на поверхности индуктора; г – зависимость электромагнитной силы  $F$  от полюсного шага  $\tau$ , проводимости расплава  $\sigma$  и частоты  $f$ ; д – распределение вихревых токов в расплаве; е – распределение электромагнитной силы по ширине канала

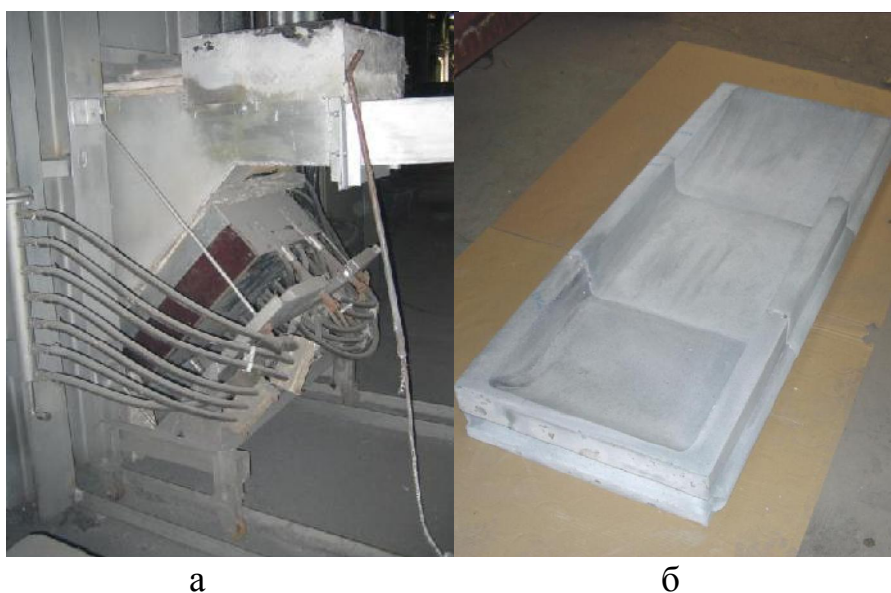


Рисунок 2– ЭМЛ: а – общий вид; б – керамический канал ЭМЛ

### 1.3 Термоэлектрические насосы

[изъята 1 страница]

### 1.4 Насос с вращающимся магнитным полем

[изъята 1 страница]

## 1.5 Насос на постоянных магнитах

Одним из перспективных направлений развития устройств транспортирования жидких металлов считается применение в качестве источника магнитного поля постоянных магнитов.

Схема насоса на постоянных магнитах показана на рисунке 8. Ротор с постоянными магнитами 1, закрепленный на валу асинхронного двигателя, вращаясь относительно с каналом расплава металла 2, наводит в нем вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов с вращающимся магнитным полем ротора с магнитами порождает объемные электромагнитные силы в расплаве, которые приводят его в движение.

Несмотря на все достоинства, такие насосы имеют большой недостаток – ограничение рабочей температуры магнитов, поэтому подобные устройства для перекачивания высокотемпературных расплавов имеют большие слои футеровки. С увеличением магнитного зазора габариты насоса существенно возрастают, а эффективность быстро падает. Поэтому насосы на постоянных магнитах получили большое применение для перекачивания низкотемпературных расплавов [4].

В металлургии данный вид насосов получил практическое применение только в качестве МГД – перемешивателей.

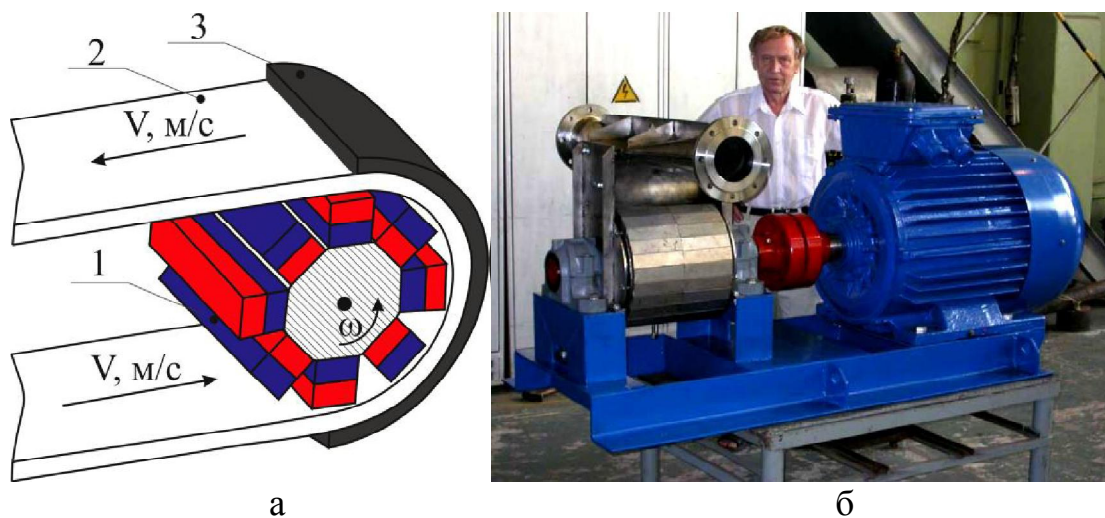


Рисунок 8 – Насос на постоянных магнитах: а – схема насоса на постоянных магнитах; б – серийный образец насоса на постоянных магнитах для HгiPb

## 1.6 Кондукционные насосы

В различных источниках понятие кондукционного насоса представляется по-разному. Одним из вариантов является такой насос, в котором токоподвод осуществляется в жидкий металл через электроды, которые непосредственно прикреплены к наружной стенке канала [8].

Кондукционные магнетогидродинамические (МГД) насосы могут работать как на постоянном, так и на переменном токе. В обоих вариантах проводящая жидкость приводится в движение в результате одних и тех же физических процессов.

### 1.6.1 Кондукционный насос постоянного тока

Кондукционный насос постоянного тока, как показано на рисунке 9, это самый простой вариант исполнения МГД-насоса. Для того чтобы создать поле в жидком металле, используются постоянные магниты или электромагниты. В данной конструкции насоса отсутствуют подвижные части, что является большим преимуществом вместе с простотой замены деталей. В насосах рассматриваемого типа электрический ток  $I$  и магнитный поток  $\Phi$  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. Активную зону МГД-насоса можно рассматривать как пересечение трёх цепей: электрической, магнитной и гидравлической. Величина тока  $I$  в электрической цепи, а следовательно и величина плотности тока в активной зоне  $J$  зависят от величины электродвижущей силы  $e_э$ . Величина магнитного потока  $\Phi$  в магнитной цепи, а следовательно и величина магнитной индукции в активной зоне  $B$  зависят от величины магнитодвижущей силы  $e_м$ . Поэтому МГД-насос позволяет плавно управлять величиной электромагнитной силы  $f_{эм}$  в активной зоне и величиной расхода в канале  $Q$ . Если в гидравлической цепи имеется внешняя гидродвижущая сила  $e_г$  (сила тяжести, перепад давления, механический насос), то МГД-насос может работать в режимах двигателя, тормоза и генератора.

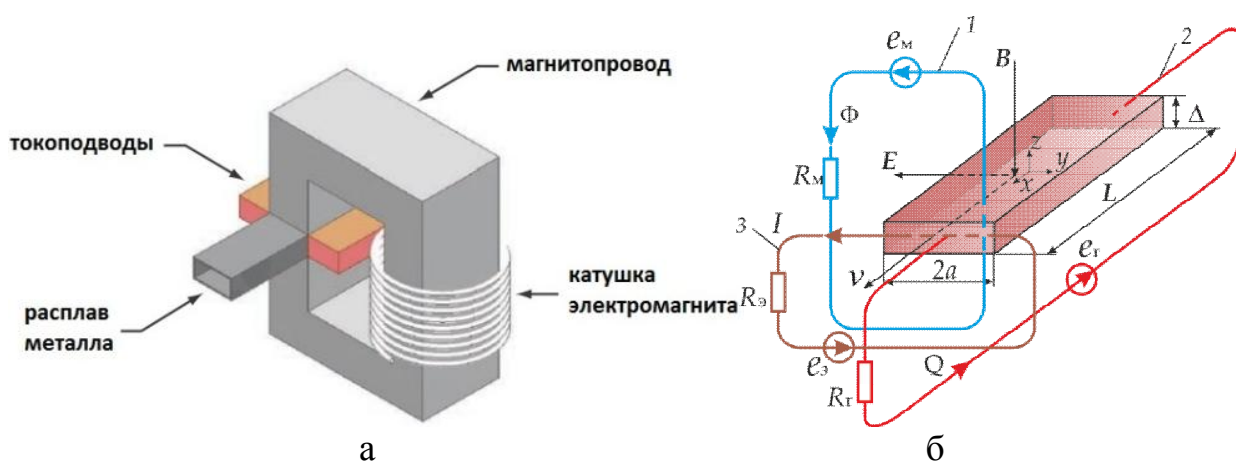


Рисунок 9 – МГД-насос постоянного тока: *а* – устройство; *б* – схема замещения магнитной, электрической и гидравлической цепей

В то же время с простотой конструкции данный вид насосов имеет некоторые потери, которые могут серьезно ухудшить производительность, в зависимости от режима работы насоса.

Одним из недостатков является проявление реакции действия якоря. Электрический ток, протекающий через канал, создает свое магнитное поле, которое усиливает магнитное поле электромагнита на входе в активную зону и ослабляет его на выходе.

В кондукционных насосах, применяемых в атомной энергетике для перекачивания жидкометаллических теплоносителей, допускаются большие скорости перекачивания расплава металла, который представляет собой охлаждающую жидкость, а проводимость перекачиваемой среды сравнительно велика и, соответственно, велико магнитное число Рейнольдса, которое с увеличением оказывает отрицательное влияние на развиваемое насосом давление. Поэтому компенсация реакции действия якоря в энергетических устройствах всегда целесообразна.

В МГД–устройствах металлургического назначения скорость движения жидкого металла меньше, ниже также и электропроводность металла. По этой причине магнитное число Рейнольдса в данных устройствах невелико, следственно компенсация реакции якоря часто оказывается ненужной [9].

Также отрицательное влияние на работу насоса оказывает канал системы, по которому протекает жидкий металл. В большинстве случаев он изготовлен из нержавеющей стали, у которой электропроводность меньше чем перекачиваемого металла, но все равно высока. Следовательно, стенки канала действуют как резистор, включенный параллельно с жидким металлом. Данный вид потерь может быть уменьшен путем изменения материала из которого выполнен канал на высокорезистивный. Данную проблему решить достаточно сложно по причине того, что к материалу предъявляются высокие требования, например он должен выдерживать высокие температуры и не вступать в химическую реакцию с перекачиваемым металлом.

Также в насосах, применяемых в атомной энергетике, подразумевается перекачивание охлаждающего металла, а пропускание тока через него приводит к нагреву, так как по закону Джоуля-Ленца [10] происходит выделение тепла в проводнике, что для насосов в металлургической промышленности является достоинством по причине необходимости подогрева перекачиваемого металла.

$$Q=I^2 Rt, \tag{1}$$

где  $I$  – ток, протекающий через проводник;

$R$  – сопротивление проводника;

$t$  – время пропускания тока через проводник.

## 1.6.2 Кондукционный насос переменного тока

Главным отличием кондукционного насоса переменного тока от кондукционного насоса постоянного тока является способ передачи тока в жидкий металл, а также создание магнитной индукции в нем же. Как видно на рисунке 10, подведенный к катушкам трансформаторов 2 электрический ток создает в магнитопроводах магнитные потоки, один из которых индуцирует в жидком металле, образующем короткозамкнутый виток, переменный ток, а другой создает магнитный поток, для создания которого используется разрезной магнитопровод, в который помещается канал. Зона, в которой пересекаются электрическая, магнитная и гидравлическая цепи, называется активной зоной.

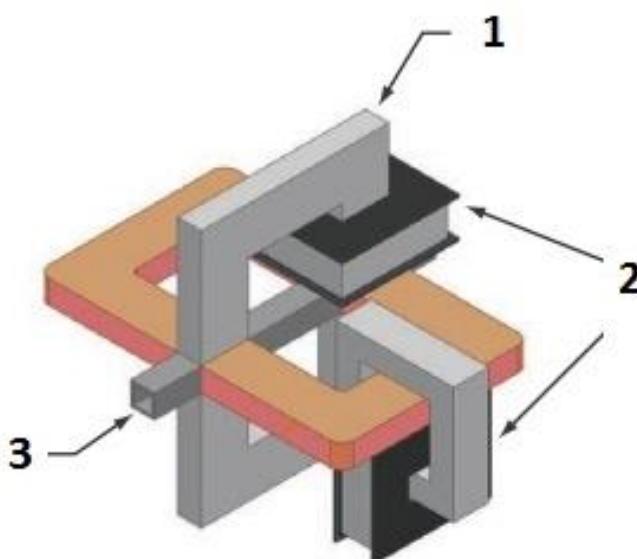


Рисунок 10 – МГД–насос переменного тока: 1– магнитопровод; 2– трансформаторы; 3– канал с металлом

При питании насоса переменным током магнитная цепь его выполняется из листов шихтованной стали, при этом электромагнитная сила определяется выражением:

$$f_{эм} = J \times B, \quad (2)$$

где  $J$  – плотность тока;

$B$  – магнитная индукция.

Электромагнит делает кондукционный насос переменного тока более сложным и в целом тяжелее по отношению к насосу, использующему постоянные магниты.

Все вышеперечисленные потери также присутствуют и в данном насосе. В дополнение к ним добавляются потери от вихревых токов. Вихревыми токами

(также токами Фуко) называются электрические токи, возникающие вследствие электромагнитной индукции в проводящей среде (обычно в металле) при изменении пронизывающего её магнитного потока. Вихревые токи порождают свои собственные магнитные потоки, которые, по правилу Ленца, противодействуют магнитному потоку катушки и ослабляют его. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, что является тепловыми потерями [11].

Также очень важной проблемой насосов переменного тока является разность фаз токов трансформатора, наводящего ток в канале и трансформатора, создающего магнитный поток который пронизывает этот канал. Даже если обе катушки, создающие ток в металле и магнитное поле пронизывающее его, запитаны от одного источника напряжения, они необязательно будут в одной фазе. Сопротивление магнитной цепи трансформаторов может отличаться, что приводит к сдвигу фаз одного по отношению к другому. Любой сдвиг фаз приводит к уменьшению силы, действующей на металл, снижая производительность насоса. Для получения максимальной мощности насоса требуется софазность питающих токов [12].

### **1.6.3 Кондукционные насосы металлургического назначения**

Основная проблема в кондукционных МГД – насосах металлургического назначения – это обеспечение надежного контакта жидкого металла с токоподводами внешней цепи. Контактное сопротивление особо велико, если жидкий металл не смачивает поверхности электродов или смачивание идет по окисным пленкам. В этом случае сопротивление контакта определяется сопротивлением окисного слоя. По этой причине условия работы металлургического МГД – устройства существенно отличаются от условий работы кондукционных насосов в закрытых циркуляционных контурах ядерных энергоустановок.

Имеется несколько путей, по которым идут поиски решения проблемы контактирования для металлургических кондукционных МГД – устройств:

1. Поиск материалов, сочетающих электропроводимость с устойчивостью к эрозии в расплавленном металле;

2. Использование охлаждаемых электродов, контактирующих с жидким металлом через гарнисаж, образующийся на электродах (чаще всего тоже выполненных из этого металла);

3. Ввод тока в жидкий металл через жидкометаллические электроды, при этом твердые токоподводы и агрессивный расплав разделяют слоем тяжелого, но более легкоплавкого жидкого металла, не вступающего во взаимодействие ни с материалом токоподводов, ни с расплавом.

Практический интерес имеет конструкция насоса, представленная на рисунке 11, в которой вторичная цепь трансформатора выполнена в виде канальной части из жаропрочного бетона, заполненной тем же металлом, который транспортируется по основному каналу б.

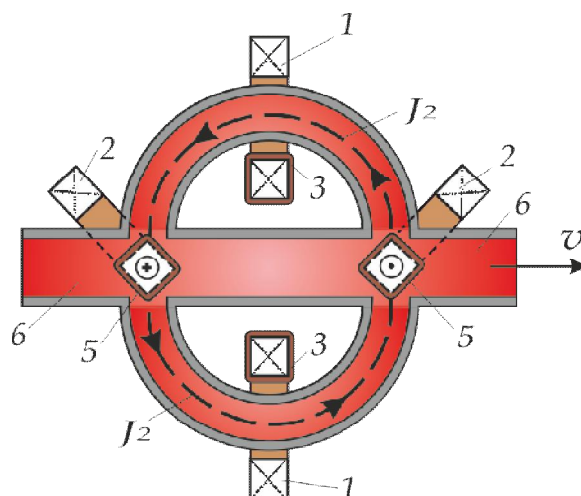


Рисунок 11 – Двухзонный кондукционный МГД–насос канального типа

Кондукционный МГД – насос трансформаторного типа с жидкометаллическими токоподводами В.П. Полищук в 1962 г. [13] предложил назвать «магнитогидродинамическим», включил в сборник рекомендуемых терминов по магнитной гидродинамике [14].

Как показано на рисунке 11, канальная часть насоса имеет  $\Phi$ -образную форму, которая охватывает два замкнутых магнитопровода 1 с расположенными на них обмотками 3. Модель имеет две крестообразные рабочие (активные) зоны, которые расположены в зазорах магнитопроводов 2 с обмотками 5.

Обмотки выполнены в виде двух секций, расположенных по обе стороны от рабочих зон.

Принцип действия. Подведенные к катушкам 3 переменные электрические токи создают в магнитопроводах 1 переменные магнитные потоки, которые индуктируют в жидком металле, образующим два короткозамкнутых витка, кольцевой ток  $I_2$ . Если обмотка 3 имеет число витков  $W_1$ , а вторичный виток жидкого металла с  $W_2 = 1$ , то из теории трансформаторов следует, что  $I_2 \approx W_1 I_1$ .

При питании обмоток 5 переменными токами  $I_5$  (токи электромагнитов) в магнитопроводах 2 создаются пульсирующие магнитные потоки, направления индукций которых  $B_1$  и  $B_2$  в рабочих зонах показаны на рисунке 11 знаками «+» и «-» соответственно.

При взаимодействии электрического тока  $I_2$  с магнитными потоками в жидком металле возникают объемные электромагнитные силы, направления которых определяются правилом левой руки. Постоянные во времени составляющие создают гидравлический напор и обеспечивают транспортирование металла по каналу 6. В каждой рабочей зоне под действием электромагнитных сил возникает электромагнитное давление, которое можно



определить как отношение интегральной электромагнитной силы  $F^{EM}$  к площади выходного сечения рабочей зоны. То есть

$$P = P_1 + P_2 = \frac{1}{S_1} \int_{V_1} f_1 dV + \frac{1}{S_2} \int_{V_2} f_2 dV, \quad (3)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объемы рабочих зон;

$S_1$  и  $S_2$  – площади выходных сечений рабочих зон.

Если направления магнитных индукций  $B_1$  и  $B_2$  противоположны, то направления интегральных электромагнитных сил в зонах будут совпадать. Изменив направление одного из магнитных потоков, получим встречное направление электромагнитных сил  $f_1$  и  $f_2$ . Изменив оба направления магнитных потоков, изменим направление обеих сил  $f_1$  и  $f_2$  на противоположное. Таким образом, двухзонный кондукционный МГД – насос позволяет осуществлять реверсирование направления электромагнитного давления. Такая конструкция МГД – устройства может использоваться в режиме транспортировки металла (режим насоса) или сдерживания внешнего напора (режим тормоза).

Если предположить, что  $J$  и  $B$  в пределах активной зоны распределены равномерно, то есть  $J = I_2 / \Delta L$ ;  $B = \Phi / 2aL$ , то условный перепад давления в пределах активной зоны будет равен отношению интегральной электромагнитной силы  $F^{EM}$  к площади выходного сечения.

$$P^{EM} = \frac{1}{\Delta 2a} \int \text{Re}\{ \underline{J} \underline{B}^* \} dV = 2JBL \text{Cos} j, \quad (4)$$

где  $\underline{J}$  и  $\underline{B}^*$  – комплексное и комплексно сопряженное значения плотности тока и магнитной индукции соответственно.

В реальных МГД – насосах распределение  $J$  и  $B$  в активной зоне неравномерно, что вызывает неоднородность электромагнитных сил и перемешивание металла, которые ослабляют перепад давлений между её выходом и входом. Это снижение давлений в приближённых расчётах учитывают коэффициентом ослабления  $k = P_H^{EM} / P^{EM}$ . Здесь  $P_H^{EM}$  – перепад давления при неравномерном распределении электромагнитных сил и отсутствии транзитного течения в активной зоне. Давление в активной зоне при наличии транзитного течения можно определить выражением:

$$P = P^{EM} k - \frac{z_a \Gamma_m}{4a^2 \Delta^2} Q^2, \quad (5)$$

где  $z_a$  – коэффициент гидравлического сопротивления активной зоны.

Если в  $\Phi$ -образной канальной части убрать средний канал, то получится МГД – насос с О-образной канальной частью, как показано на рисунке 13. Кольцевой трубопровод 4 охватывает центральный стержень замкнутого магнитопровода 3 с расположенной на нем обмоткой 2. Место соединения отводящего канала 8 с кольцевым трубопроводом расположено в зазоре магнитопровода электромагнита 6, обмотка которого выполнена в виде двух катушек 7, размещенных по обе стороны от рабочей зоны 1. Такая рабочая зона называется тройниковой. На рисунках 12а и 12б представлены крестообразная и тройниковая рабочие зоны.

Если МГД – насосы с крестообразной рабочей зоной имеют коэффициент ослабления  $k = 0,8 \div 0,9$ , то насосы с тройниковой рабочей зоной имеют  $k = 0,4 \div 0,6$ .

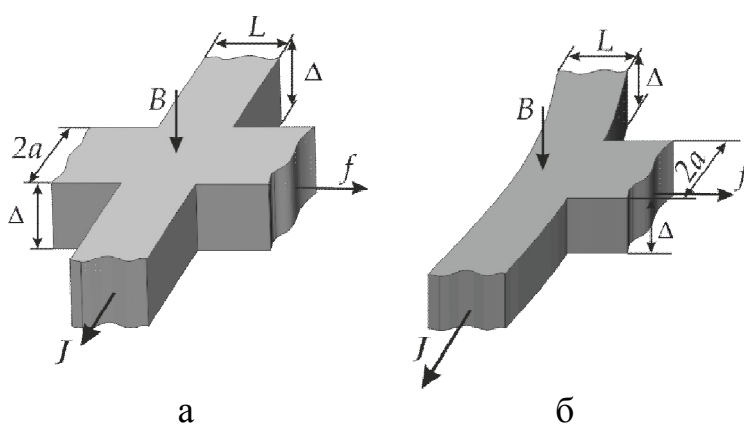


Рисунок 12 – Рабочие зоны кондукционного насоса:  
а – крестообразная; б – тройниковая

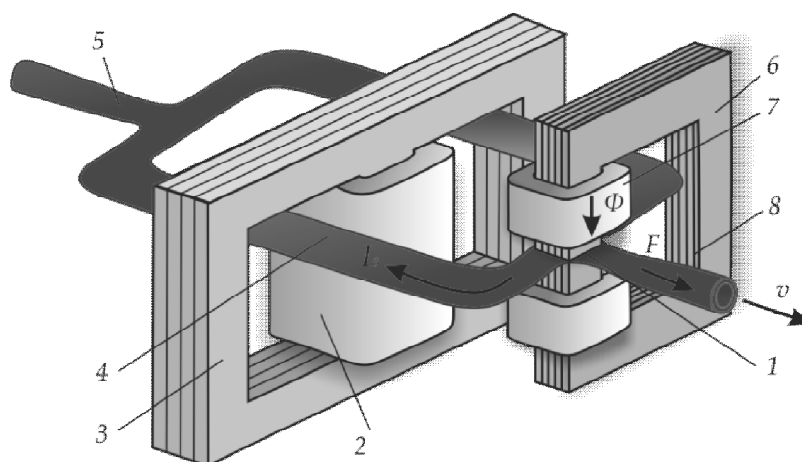


Рисунок 13 – МГД – насос с тройниковой рабочей зоной

Эффективность МГД – насоса определяется его полным гидравлическим КПД

$$h_h = \frac{P_Q}{P_I + P_M}, \quad (6)$$

где  $P_I$  и  $P_M$  – мощности, подведенные к индуктору и магниту;  
 $P_Q$  – полезная гидравлическая мощность.

Обычно  $h_h$  для металлургических МГД – устройств составляет десятые доли процента и не является определяющим фактором.

Поскольку в канальной части МГД – насоса происходит нагревание жидкого металла, то практический интерес представляет также термический КПД:

$$h_T = \frac{r_m C_m Q (T_2 - T_1)}{P_I + P_M}, \quad (7)$$

где  $C_m$  – теплоемкость металла;

$T_1$  и  $T_2$  – температуры металла в начале и конце металлотракта.

В эксплуатационных МГД – насосах термический  $h_T \approx 30 - 70 \%$ , электрический  $h_E \approx 50 - 80 \%$ . Иногда оперируют гидротермическим КПД

$$h_{HT} = h_h + h_T. \quad (8)$$

Основные преимущества МГД – 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 ( $\cos j = 0,6 \div 0,8$ );

6. Простая, надежная и удобная для охлаждения, замены и ремонта конструкция обмоток.

## 1.7 Выводы по главе

[изъят 1 абзац]



## 2 Физическая и математическая модель одновиткового насоса трансформаторного типа. Моделирование процесса транспортирования жидкого металла

Транспортирование расплава металлов является неотъемлемым звеном технологических процессов в литейном производстве. Приложение магнитной гидродинамики имеет большое значение в металлургии для создания способов транспортирования жидкого металла, его разливки и ряда других технологических операций, связанных с движением жидкого металла и бесконтактным воздействием на него. Для физического моделирования был выбран одновитковый МГДН трансформаторного типа. По принципу действия данный насос подобен электротехнической стали с расположенной на нем катушкой из изолированного провода 2. Магнитопровод с катушкой называется индуктором. Металл подводится к каналу по металлопроводу 5, а отводится по металлопроводу 8. Участок 1 является активной (рабочей) зоной МГДН, действию канальной индукционной печи. Канал с жидким металлом 4 охватывает центральный стержень замкнутого магнитопровода 3, набранного из листов который находится в зазоре магнитопровода электромагнита 6, обмотки которого выполнены в виде двух катушек 7, разнесенных по обе стороны от рабочей зоны.

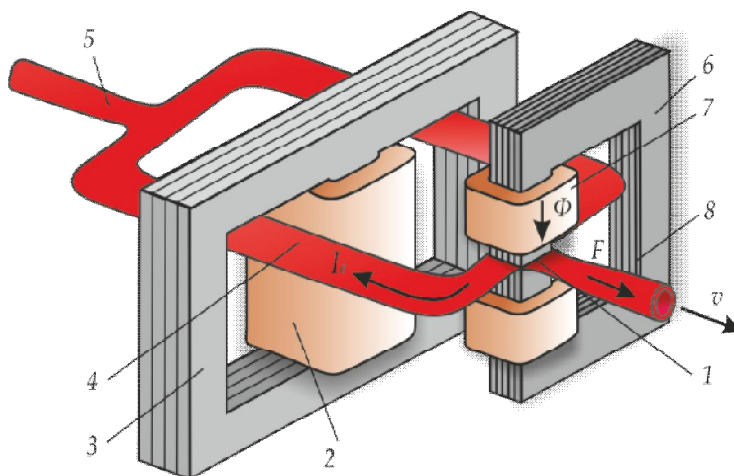


Рисунок 14– Одновитковый МГДН трансформаторного типа

### 2.1 Расчет, конструирование и изготовление одновиткового МГДН трансформаторного типа

#### 2.1.1 Канальная часть

При конструировании насоса возникает необходимость выбора материала канала насоса. Исходя из литературных данных, имеется множество различных типов материалов с различной степенью стойкости к расплавам металлов, такие

как: асбестоцемент, силицированный графит, асботермосиликаты, огнеупорный бетон и другие. Для изготовления канальной части физической модели МГДН была выбрана нержавеющая сталь марки 12Х13 по причине возможности ее соединения путем сварки и изготовления сложных форм канала.

На начальном этапе конструирования МГДН был выполнен макет канала и индуктора из картона для оценки взаимного расположения всех частей насоса и возможности их изготовления.



Рисунок 15 – Макет МГДН: а – части МГДН разобраны; б – части МГДН в сборе

Для измерения перепада высот металла, который может создать насос, канальная часть была доработана и принимает следующий вид (рисунок 16).

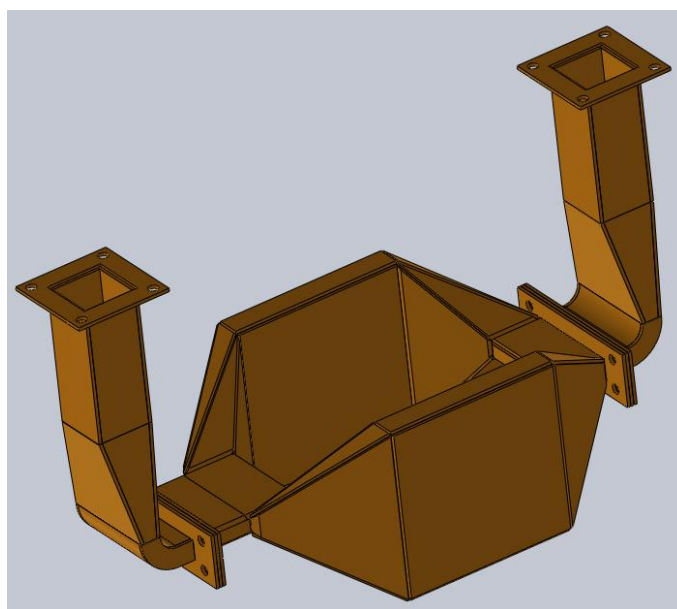


Рисунок 16 – Канальная часть для измерения перепада высот

## 2.1.2 Основной трансформатор

Для создания основного магнитопровода было отобрано два магнитопровода от трансформаторов подходящего размера, которые впоследствии были соединены в один основной. В дальнейшем все расчеты будут производиться, исходя из размеров данного магнитопровода (рисунок 17).

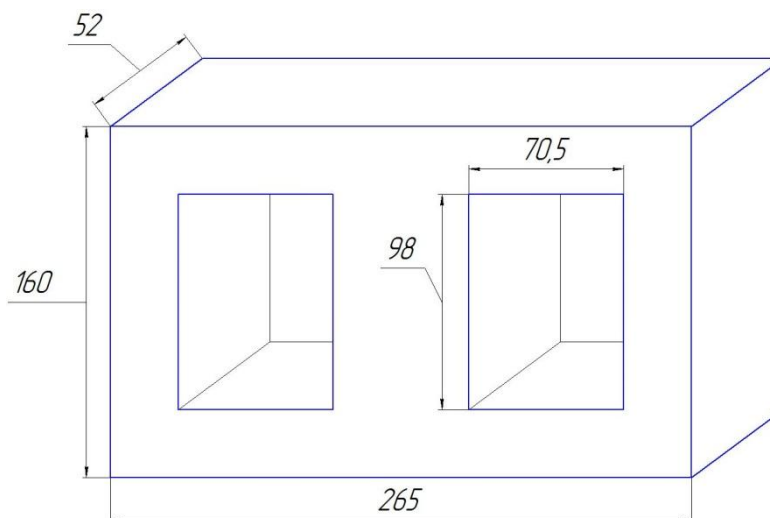


Рисунок 17 – Магнитопровод основного трансформатора

По графику кривых намагничивания магнитномягких материалов определяем напряженность магнитного поля  $H = 2 \text{ А/см}$  для создания индукции  $B = 1 \text{ Тл}$ . Допустимую плотность тока в проводнике принимаем  $d = 4 \text{ А/мм}^2$ .

Длина средней линии магнитопровода, мм

$$l_{cp} = 2 \cdot l_a + 2 \cdot l_b = 2 \cdot 100 + 2 \cdot 130 = 460, \quad (9)$$

где  $l_a$  – высота средней линии магнитопровода;

$l_b$  – ширина средней линии магнитопровода.

Площадь поперечного сечения магнитопровода,  $\text{мм}^2$

$$S_{cep} = a_1 \cdot b_1 = 31 \cdot 104 = 3224. \quad (10)$$

ЭДС на одном витке катушки, В/виток

$$E_{1m} = B \cdot w \cdot S_{cep} = 1 \cdot 314 \cdot 32 \cdot 10^{-4} = 1, \quad (11)$$

где  $w = 2 \cdot p \cdot f$  – циклическая частота электромагнитного поля.

Число витков катушки определяем из формулы, витков

$$w = \frac{E_m}{E_{1m}} = \frac{310}{1} = 310. \quad (12)$$

Катушка основного трансформатора намотана проводом  $d = 1,7$  мм с числом витков  $w = 314$  витков.

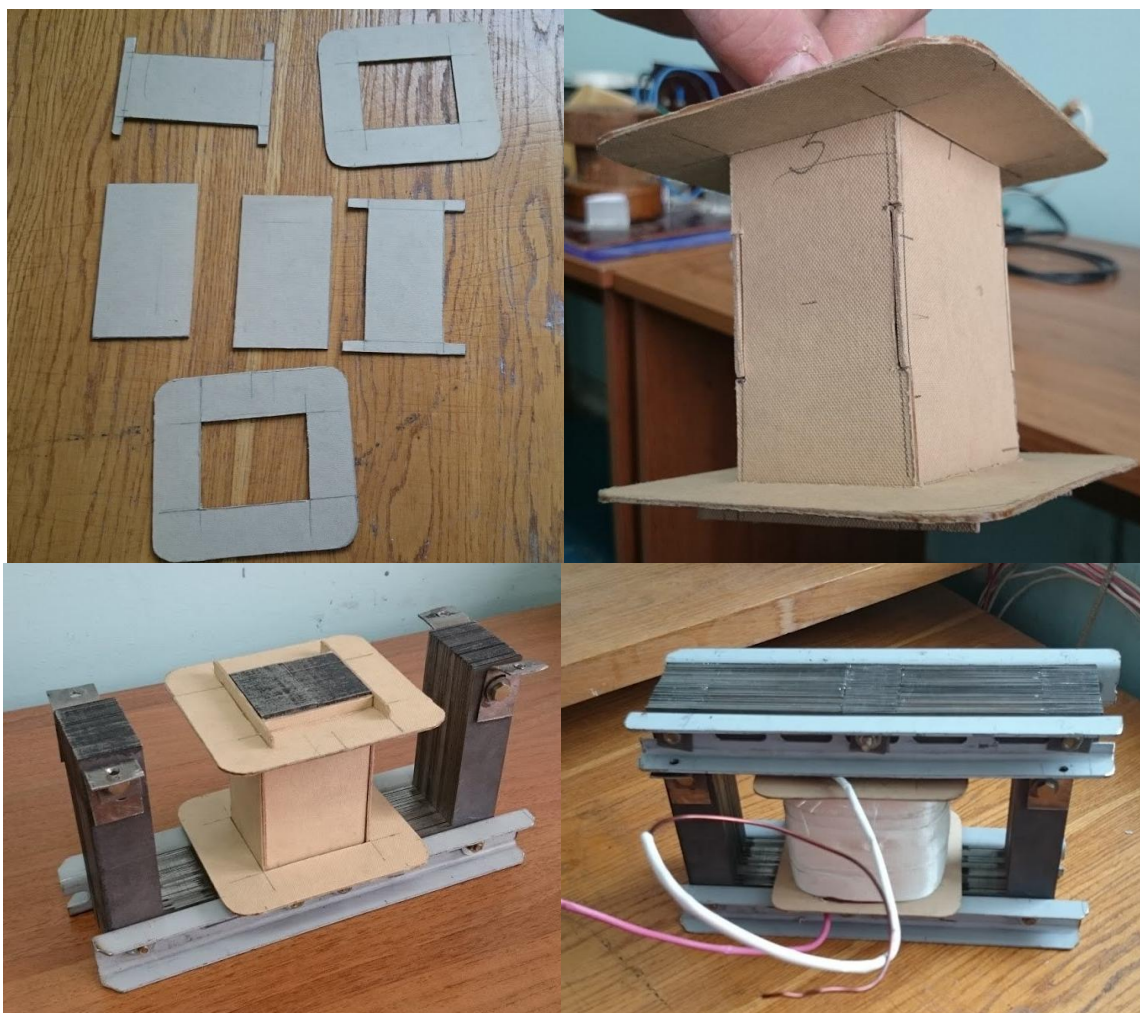


Рисунок 18 – Изготовление основного трансформатора

### 2.1.3 Электромагнит

Магнитопровод электромагнита также собран из нескольких магнитопроводов подходящего размера. Зазор электромагнита определяется толщиной выходной части канала (активной зоны). Электрические параметры электромагнита рассчитываются для условия, когда магнитная система индуктор-канал работают взаимосвязано. Для МГДН металлургического назначения свойственно относительно большое расстояние немагнитного



зазора, которое складывается из толщины стенки канала металлопровода и футеровки. Это вызывает большое рассеяние магнитного поля в зазоре. Как известно, рабочий поток, действующий на металл, составляет до 10 % от общего потока, создаваемого катушкой электромагнита[15]. Вследствие этого, для создания индукции в зазоре нужно затратить значительную мощность.

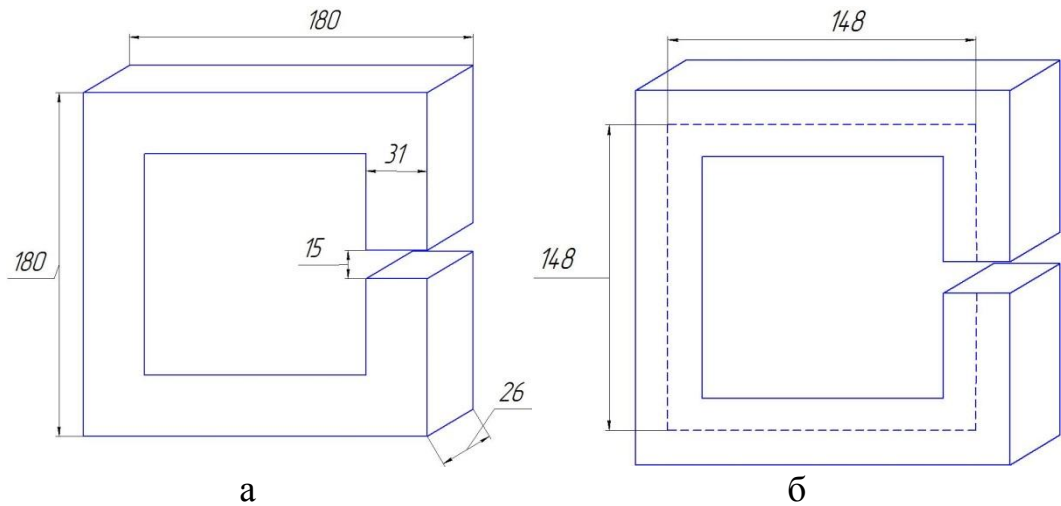


Рисунок 19 – Эскиз электромагнита: а – основные размеры; б – средние линии

Площадь поперечного сечения магнитопровода, мм<sup>2</sup>

$$S_{сеп} = a_2 \cdot b_2 = 26 \cdot 31 = 806 . \quad (13)$$

Длина средней линии магнитопровода, мм

$$l_{ср} = 4 \cdot l - l_d = 4 \cdot 148 - 15 = 577 . \quad (14)$$

Величина немагнитного зазора, мм

$$l_d = 15 . \quad (15)$$

Для получения магнитной индукции  $B = 1$  Тл по кривой намагничивания для электротехнической стали (рисунок 20) определяем величину напряженности магнитного поля  $H = 2$  А/см<sup>2</sup>.

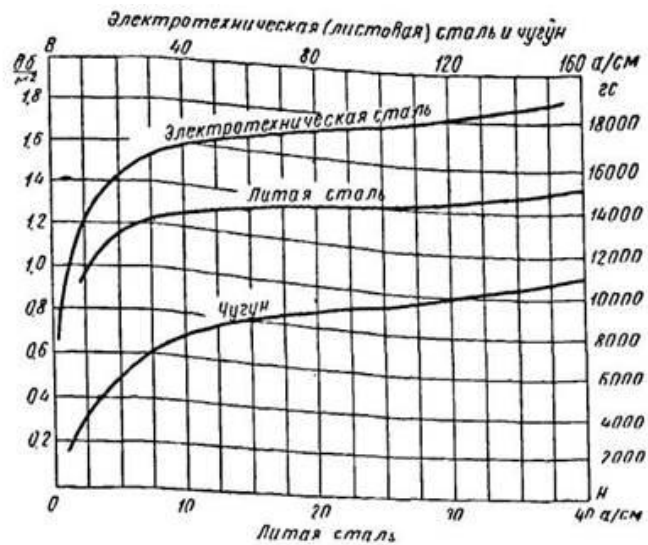


Рисунок 20 – Кривая намагничивания электротехнической стали

Падение напряжения магнитного поля на сердечнике, А

$$H_{cm} = H \cdot l_{cp} = 2 \cdot 57,7 = 115. \quad (16)$$

Значение напряженности магнитного поля в зазоре для достижения заданной индукции, А/см

$$H_3 = \frac{B}{m_0} = \frac{1}{1,25 \cdot 10^{-6}} = 7,95 \cdot 10^3, \quad (17)$$

где магнитная постоянная  $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,25 \cdot 10^{-6}$ .

Падение напряжения магнитного поля в зазоре, А

$$H_d = H_3 \cdot l_d = 7,95 \cdot 10^3 \cdot 1,5 = 12 \cdot 10^3. \quad (18)$$

Величина, характеризующая способность электрических токов создавать магнитные потоки - магнитодвижущая сила (МДС) равна, А

$$F = H_{cm} + H_d = 115 + 12 \cdot 10^3 = 12,1 \cdot 10^3. \quad (19)$$

Допустимую плотность тока в проводнике принимаем  $d = 4 \text{ А/мм}^2$

Площадь поперечного сечения катушки,  $\text{см}^2$

$$S_{обм} = \frac{F}{d} = \frac{12,1 \cdot 10^3}{4} = 30. \quad (20)$$

Магнитное сопротивление зазора, Ом

$$R_m = \frac{l_d}{\mu_0 \cdot S_{сер}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-2}}{1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 1,49 \cdot 10^7. \quad (21)$$

Диаметр проводника  $d = 2 \text{ мм}^2$ , площадь сечения проводника,  $\text{мм}^2$

$$S_{np} = \frac{p \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14. \quad (22)$$

Допустимая сила тока при заданной плотности в проводнике, из которого будет изготавливаться катушка, А

$$I_{\max} = S_{np} \cdot d = 3,14 \cdot 4 = 12,56. \quad (23)$$

Число витков обмотки, витков

$$w = \frac{S_{обм}}{S_{np}} = \frac{3,01 \cdot 10^3}{3,14} = 959. \quad (24)$$

Магнитный поток, проходящий через зазор, Вб

$$\Phi = \frac{w \cdot I}{R_m} = \frac{959 \cdot 10}{1,49 \cdot 10^7} = 6,42 \cdot 10^{-4}. \quad (25)$$

Магнитная индукция в зазоре, Тл

$$B = \frac{\Phi}{S_{сер}} = \frac{6,42 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-4}} = 0,803. \quad (26)$$

Так как расчет проводился без учета индуктивного сопротивления, которое зависит от формы катушки[16], для начала было принято решение намотать меньшее число витков. Путем подбора оптимальных параметров катушки число витков составило  $w = 586$ , действующее значение тока  $I = 10 \text{ А}$  при напряжении сети  $U = 220 \text{ В}$ .

Расчетное значение магнитного потока, Вб

$$\Phi = \frac{w \cdot I}{R_m} = \frac{586 \cdot 10}{1,49 \cdot 10^7} = 3,92 \cdot 10^{-4}. \quad (27)$$

Магнитная индукция в зазоре, Тл

$$B = \frac{\Phi}{S_{\text{сеп}}} = \frac{3,9 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-4}} = 0,49. \quad (28)$$

В ходе проведения эксперимента был составлен график зависимости магнитной индукции  $B$  (Тл) от тока питающей катушки  $I$  (А) (рисунок 22) в разных точках магнитопровода (рисунок 23). Магнитная индукция измерялась с помощью витка провода замкнутого вокруг магнитопровода.

$$B_m = \frac{E_m}{w \cdot S_g \cdot w}, \quad (29)$$

где  $E_m$  – значение ЭДС снимаемое с витка;

$w$  – циклическая частота;

$S_g$  – площадь витка;

$w$  – число витков.

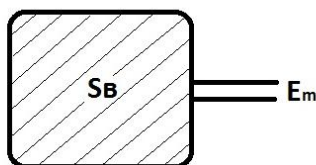


Рисунок 21 – Форма витка для измерения магнитной индукции

[изъята 1 страница]

Ниже представлены фотографии изготовления магнитопровода, намотки катушки и сборки.





Рисунок 24 – Изготовление электромагнита

## 2.2 Проведение экспериментов на физической модели МГДН

### 2.2.1 Опыт короткого замыкания

[изъята 1 страница]

### 2.2.2 Определение КПД трансформатора

Для исследования трансформатора поверх катушки было намотано 30 витков провода с последовательно включенным сопротивлением  $R_2$ , в первичную обмотку включено сопротивление  $R_1$ .

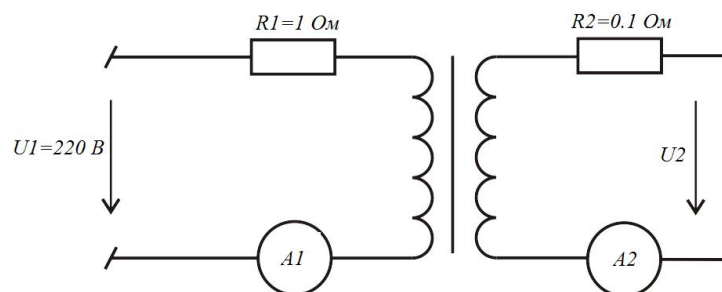


Рисунок 27 – Схема включения трансформатора

Мощность, потребляемая из сети трансформатором [15], Вт

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = 220 \cdot 4,38 = 963. \quad (30)$$

Мощность, отдаваемая трансформатором в нагрузку, Вт

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 15,8 \cdot 43,3 = 695. \quad (31)$$

Эффективность преобразования энергии в трансформаторе характеризуется КПД [16]

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{695}{963} = 0,72. \quad (32)$$

### 2.2.3 Определение тока трансформатора в зависимости от нагрузки

В ходе проведения эксперимента были определены значения питающего тока трансформатора  $I_1$  в зависимости от нагрузки, которой является канал из нержавеющей стали, а также металл, которым он заполнен, при различном питающем напряжении. Исходя из данных таблицы 1, можно сделать вывод, что ток в катушке тем больше, чем меньше удельное электрическое сопротивление нагрузки. Значение величины тока наводимого в пустом канале  $I_2 = 370$  А при питающем напряжении трансформатора  $U_1$  В.

[изъят 1 абзац]

### 2.2.4 Сдвиг фаз тока и напряжения трансформатора и основной катушки

Как было сказано ранее, по принципу действия кондукционный МГД – насос аналогичен однофазному трансформатору, работающему в режиме короткого замыкания [17]. Одновитковой вторичной обмоткой является канальная часть, заполненная жидким металлом. Схема замещения трансформатора (рисунок 28а) представляет собой сочетание двух схем замещения – первичной и вторичной обмоток.

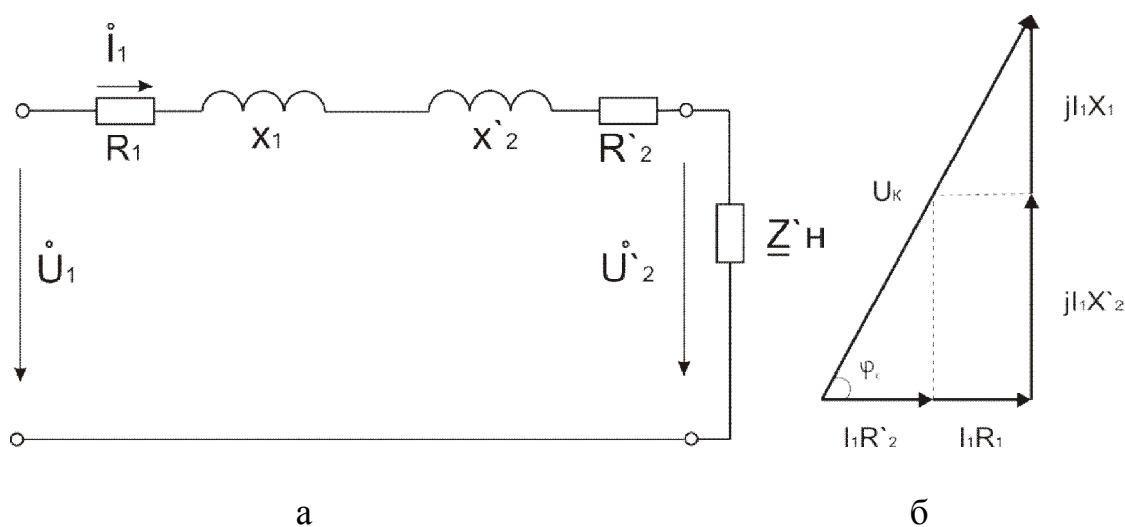


Рисунок 28 – Схема замещения трансформатора: а – эквивалентная схема замещения; б – векторная диаграмма напряжений

В цепи первичной обмотки включены активное и индуктивное сопротивления  $R_1$  и  $X_1$ , аналогично во вторичной обмотке – сопротивления  $R'_2$  и  $X'_2$ . По треугольнику векторной диаграммы напряжений (рисунок 28б) видно, что напряжение короткого замыкания  $U_k$  зависит от активной и индуктивной составляющих падения напряжения [18].

$$\operatorname{tg} j_k = \frac{X_k}{R_k}, \quad (32)$$

где  $X_k = X_1 + X'_2$ ;  
 $R_k = R_1 + R'_2$ .

Так как основная катушка находится на замкнутом магнитопроводе, сопротивление почти полностью будет активным, в отличие от катушки электромагнита, находящейся на магнитопроводе с зазором.

Индуктивное сопротивление катушек значительно отличается. При питании электромагнита и основной катушки от одной фазы напряжения фаза потока  $\Psi_2^\phi$  и тока  $\Psi_2^I$  будут отличаться.

$$\Psi = \Psi_2^I - \Psi_2^\phi. \quad (33)$$

[изъята 1 страница]

### 2.2.5 Эксперимент с определением сдвига фаз тока в основной катушке $I_1$ и тока в канале $I_k$ на физической модели

Для определения сдвига фаз между током в основном трансформаторе  $I_1$  и током, наводимым в канальной части насоса  $I_k$ , был изготовлен небольшой разборный магнитопровод с витками намотанными поверх него.

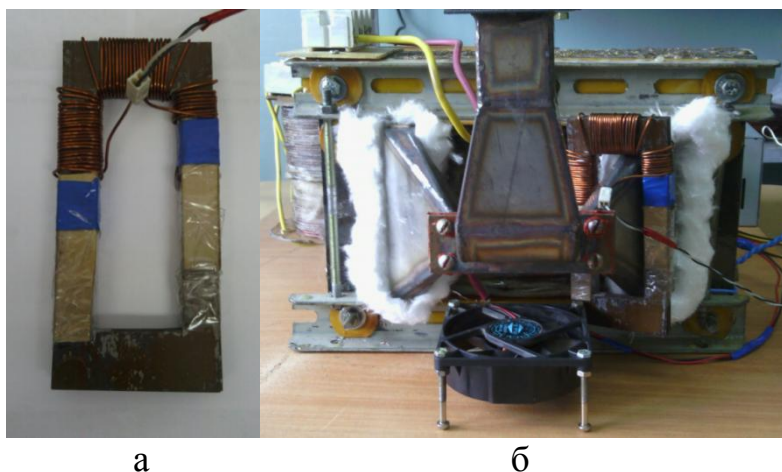


Рисунок 30 – Основной трансформатор: а – магнитопровод свиткам для измерения фазы тока в канале; б – расположение измерительного магнитопровода на канальной части

С витков, намотанных на данный магнитопровод, снимается величина ЭДС которая поступает на интегратор, на выходе из которого получаем фазу тока протекающего в канале. Данный принцип измерения основан на законе Фарадея [20], который гласит, что при изменении магнитного потока  $\Phi$  в проводящем контуре (в данном случае это витки, намотанные на магнитопровод) возникает ЭДС индукции, равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром (поверхность магнитопровода).

[изъят 1 абзац]

### **2.2.6 Последовательное включение основного трансформатора и электромагнита на холостом ходу без металла в металлопроводе**

[изъят 1 абзац]

### **2.2.7 Увеличения тока в цепи с помощью подключения ёмкости**

[изъята 1 страница]

Произведем расчет необходимой емкости, для создания тока в цепи  $I = 5 \text{ A}$ .

Полное сопротивление цепи, Ом

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{3,24} = 67,9. \quad (34)$$

Пренебрегая активным сопротивлением цепи принимаем, Ом

$$Z_L = Z = 68. \quad (35)$$

Находим необходимое полное сопротивление цепи, Ом

$$Z_n = \frac{220}{5} = 44. \quad (36)$$

Ёмкостное сопротивление определяем по формуле, Ом



$$X_C = X_L - X_{общ} = 68 - 44 = 24, \quad (37)$$

где  $Z_n = Z_{общ}$ .

Находим необходимую емкость, мкФ

$$C = \frac{1}{X_C} = \frac{1}{24 \cdot 314} = 132, \quad (38)$$

где  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  – циклическая частота электромагнитного поля.

[изъят 1 абзац]

### 2.2.8 Последовательное включение основного трансформатора с нагрузкой в виде канала, заполненного металлом и электромагнита

Выполним последовательное включение основного трансформатора и электромагнита (32). Нагрузкой является канал, заполненный металлом. На вход цепи подаем питающее напряжение  $U = 220 \text{ В}$ . Измерим перепад высот  $\Delta h$  (рисунок 35), создаваемый насосом, в зависимости от месторасположения действия электромагнита на выходное устье канала, показанный на рисунке 35.

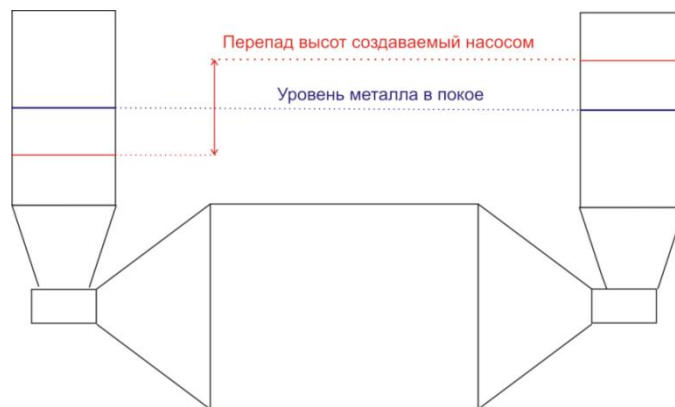


Рисунок 35– Схематичное изображение канала с перепадом высот

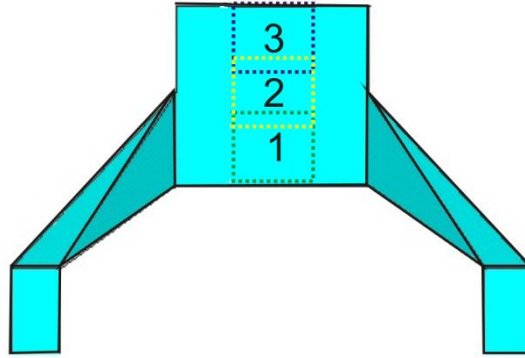


Рисунок 36 – Места расположения электроманита

[изъято 2 страницы]

**2.2.9 Определение влияния сдвига фаз тока в основной катушке и тока в катушке электромагнита на перепад давления в канале насоса**

[изъято 2 страницы]

## 2.2.10 Проведение тепловых испытаний на физической модели МГДН

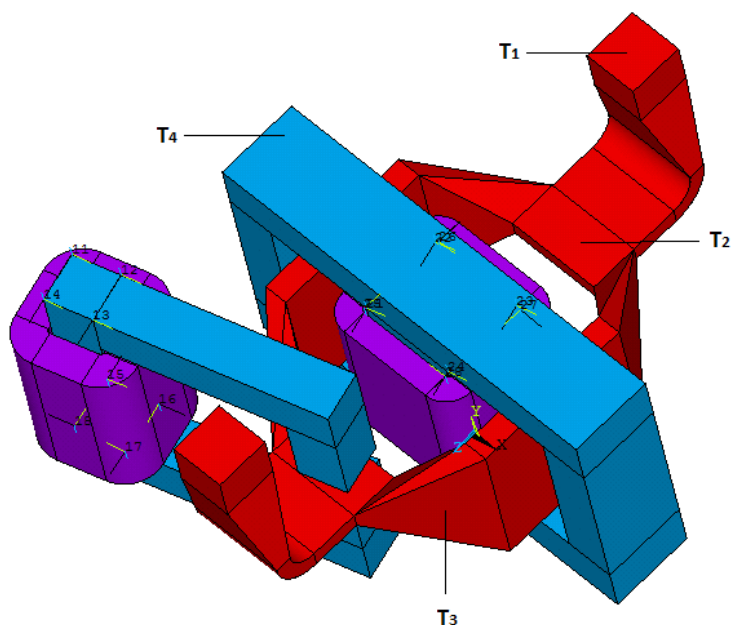


Рисунок 41 – Места измерения температуры

На физической модели проведена серия испытаний для определения температуры в различных точках насоса, с течением времени на номинальном токе  $I = 4$  А.  $T_1$  – температура металла,  $T_2$  – температура канала в устьевом участке,  $T_3$  – температура канала в месте сужения,  $T_4$  – температура магнитопровода. Значение температуры получали с помощью пирометра.

[изъят 1 абзац]

## 2.3 Выводы по главе

[изъят 1 абзац]

### 3 Математическое моделирование одновиткового МГД трансформаторного типа

#### 3.1 Постановка задачи и основные допущения

С целью определения эффективности МГД – насоса трансформаторного типа была разработана численная математическая модель в коммерческих пакетах САЕ – программ ANSYS Multiphysics (МКЭ) и ANSYS CFX (МКО). Сетка конечных элементов, аппроксимирующая всю расчетную область содержала 668020 элементов, из которых 310244 элемента аппроксимировали область расплава.

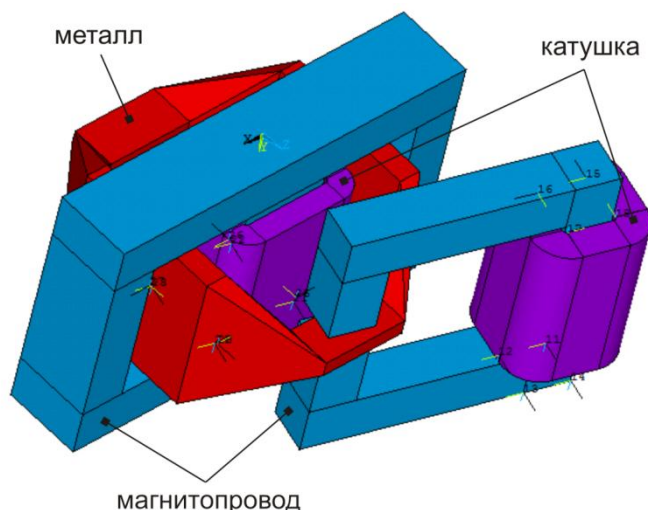


Рисунок 43 – Математическая модель МГД – насоса трансформаторного типа (окружающее пространство не показано)

Математическая модель полностью повторяет размеры физической модели. На следующих рисунках видна аналогия построения обеих моделей.

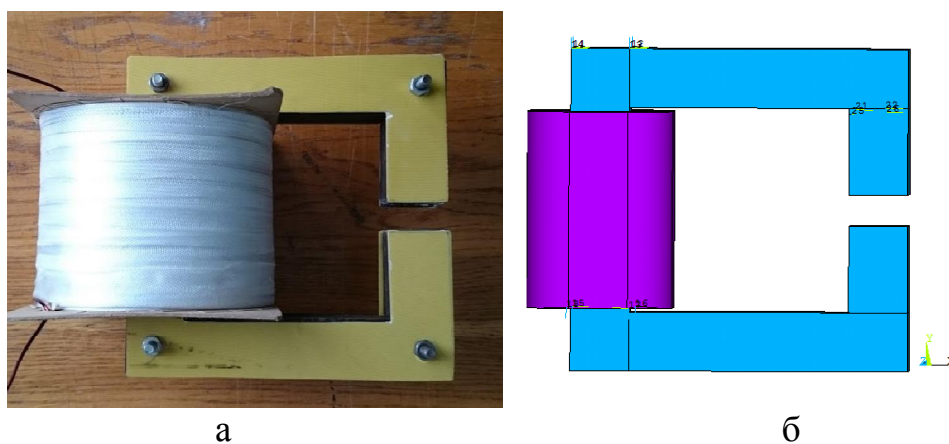
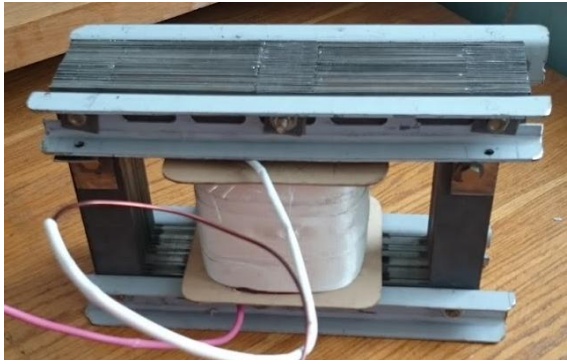
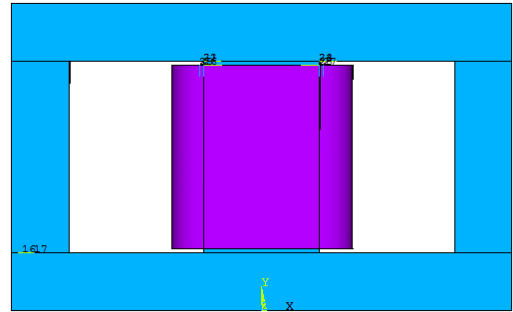


Рисунок 44 – Электромагнит: а – физическая модель; б – математическая модель

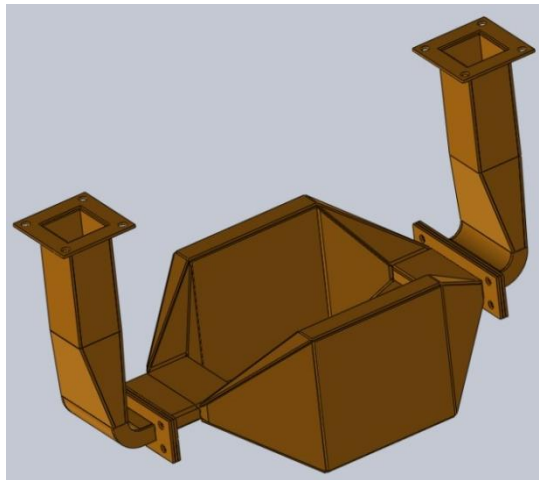


а

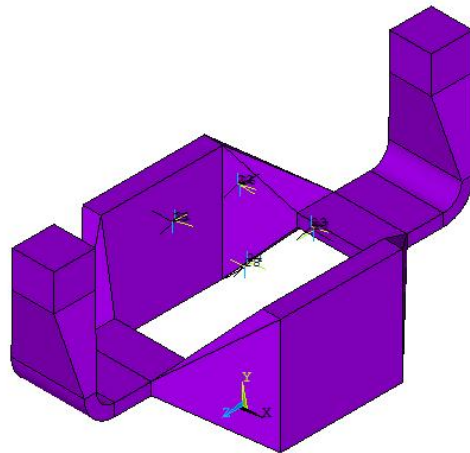


б

Рисунок 45– Основной трансформатор: а – физическая модель; б – математическая модель



а



б

Рисунок 46 – Канал: а – физическая модель; б – математическая модель перекачиваемого металла

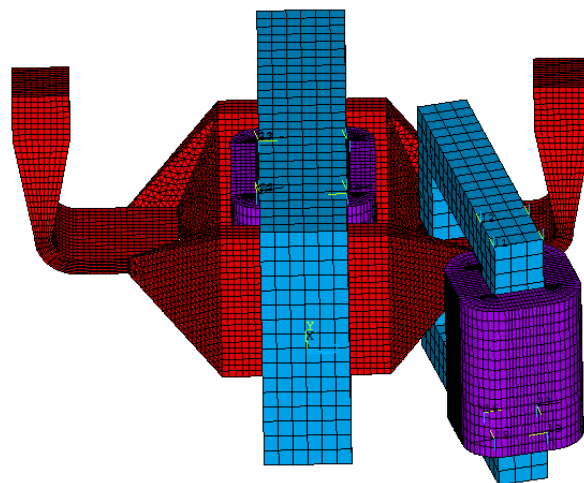


Рисунок 47 – Разбиение модели насоса на элементы

По причине сложности деталей конструкции, свойств материалов и ограниченности вычислительных возможностей для решения 3-х мерной магнитогидродинамической задачи используются нижеприведенные допущения.

Допущения электромагнитной задачи:

1. не учитываются конструктивные детали такие как крепежные болты, стеклотекстолитовые прокладки и шайбы;
2. не учтено влияние токов смещения ввиду их малости;
3. не учтена основа катушек, выполненных из электрокартона;
4. не учтена изоляция катушек;
5. не учтен канал, выполненный из нержавеющей стали;
6. задание удельного электрического сопротивления стали магнитопровода осуществляется вдоль его шихтовки  $\rho_{эл} = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;
7. магнитная проницаемость магнитопровода принимается изотропной, не зависящей от температуры;
8. расчетная область ограничена, считается, что ЭМ поле сосредоточено в некотором пространстве, размеры которого велики и не вносят существенного искажения в картину ЭМ поля.

Система уравнений, описывающих электромагнитное поле, записанная относительно векторного и скалярного потенциалов (44 и 45) и уравнения непрерывности (46) имеет вид [14, 23]

$$\nabla^2 \cdot A - \nabla \cdot \left( \nabla \cdot A + e_a \cdot m_a \cdot \frac{\partial j}{\partial t} \right) - e_a \cdot m_a \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -m_a \cdot d, \quad (44)$$

$$\nabla^2 \cdot j + \frac{\partial \nabla \cdot A}{\partial t} = -\frac{r_q}{e_a}, \quad (45)$$

$$\nabla \cdot d = -\frac{\partial r_q}{\partial t}, \quad (46)$$

где  $A$  – векторный потенциал;

$j$  – скалярный потенциал неподвижных зарядов;

$d$  – векторная плотность тока;

$e_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

$r_q$  – плотность свободных зарядов;

$t$  – время.

Вектор плотности тока уравнений (44) и (46) имеет вид

$$d = g \cdot \left( -\nabla \cdot j - \frac{\partial A}{\partial t} + v \times (\nabla \times A) \right), \quad (47)$$

где  $v$  – вектор скорости.

Пренебрегая токами смещения, а также накладывая кулоновскую калибровку ( $\nabla \cdot A = 0$ ) и учитывая отсутствие в расчетной области свободных электрических зарядов ( $r_q = 0$  и  $j = 0$ ), уравнения (44–46) можно записать в следующем виде [24]

$$\nabla^2 \cdot A = -m_a \cdot d, \quad (48)$$

$$\nabla \cdot d = 0. \quad (49)$$

Вектор плотности тока принимает следующий вид

$$d = g \cdot \left( \frac{\partial A}{\partial t} + v \times (\nabla \cdot A) \right). \quad (50)$$

Анализ электромагнитного поля в расчетной области сводится к решению системы уравнений (48–50) в 3D постановке относительно трех компонент векторного потенциала, в 2D постановке относительно азимутальной компоненты векторного потенциала.

С учетом принятых допущений, уравнения можно записать в комплексном виде

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{A} = -m_a \cdot \mathbf{d}, \quad (51)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = 0, \quad (52)$$

$$\mathbf{d} = -j \cdot g \cdot w \cdot \mathbf{A}, \quad (53)$$

где  $w = 2 \cdot p \cdot f$  – циклическая частота электромагнитного поля.

Дополним систему уравнений (51–53) граничными условиями.

Считая, что окружающая среда расчетной области имеет идеальные магнитные свойства ( $m = 0$ ), на границах расчетной области будут выполняться условия [25]

– для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial \mathbf{A}_t}{\partial n} = 0, \quad (54)$$

– для нормальной составляющей векторного потенциала:

$$\mathbf{A}_n = 0, \quad (55)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности расчетной области.

Для выполнения электромагнитного расчета исходными данными служат геометрические параметры системы, удельное электрическое сопротивление индуктора, жидкой и твердой фазы заготовки, а также амплитуда и частота питающего индуктор тока.

### 3.2 Задание нагрузок в математической модели

Рассчитываем плотность тока, задаваемую в элементах катушки математической модели. Так как в катушке трансформатора число витков  $w_1 = 314$ , ток протекающий по этим виткам  $I_1 = 4$  А (основной режим) то общий ток по сечению катушки будет равен, А

$$I_{1общ} = I_1 \cdot w_1 = 4 \cdot 314 = 1256. \quad (56)$$

Площадь сечения основной катушки рассчитывается как, м<sup>2</sup>

$$S_1 = h_1 \cdot a_1 = 0,1 \cdot 0,0015 = 0,0015, \quad (57)$$

где  $h_1$  – высота катушки;

$a_1$  – половина вертикального сечения катушки.

Плотность тока, задаваемая в катушке, А/м<sup>2</sup>

$$d_1 = \frac{I_{1общ}}{S_1} = \frac{1256}{0,0015} = 837333. \quad (58)$$

Аналогично рассчитываем параметры для катушки электромагнита, А

$$I_{2общ} = I_2 \cdot w_2 = 4 \cdot 583 = 2332, \quad (59)$$

Площадь сечения катушки, м<sup>2</sup>

$$S_2 = h_2 \cdot a_2 = 0,1 \cdot 0,02 = 0,002, \quad (60)$$

Расчетная плотность тока, А/м<sup>2</sup>

$$d = \frac{I_{2общ}}{S_2} = \frac{2332}{0,002} = 1166000. \quad (61)$$

Для определения корректного заданных параметров будем сравнивать силу  $F_\phi$ , создаваемую физической моделью насоса с силой  $F_M$ , полученную в результате математического моделирования.



Определим силу которую создает физическая модель трансформаторного насоса для создания перепада высот  $\Delta h = 40$  мм. Так как перекачиваемой жидкостью является эвтектический расплав, состоящий из 70% галлия (Ga), 20% индия (In) и 10% олова (Sn) рассчитаем среднюю плотность расплава,  $\text{г/см}^3$

$$r_{y\phi} = r_{Ga} \cdot k_{Ga} + r_{In} \cdot k_{In} + r_{Sn} \cdot k_{Sn} = 6 \cdot 0,7 + 7,31 \cdot 0,2 + 7,31 \cdot 0,1 = 6,4. \quad (62)$$

Давление, создаваемое насосом, рассчитывается по формуле [32], Па

$$P = r_{y\phi} \cdot g \cdot h = 6400 \cdot 9,8 \cdot 0,08 = 5017, \quad (63)$$

где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  ускорение свободного падения.

Развиваемая сила  $F_{\phi}$  рассчитывается как, Н

$$F_{\phi} = P \cdot S_{\text{вых}} = 5017 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 2,34, \quad (64)$$

где  $S_{\text{вых}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  – площадь сечения выходной части канала.

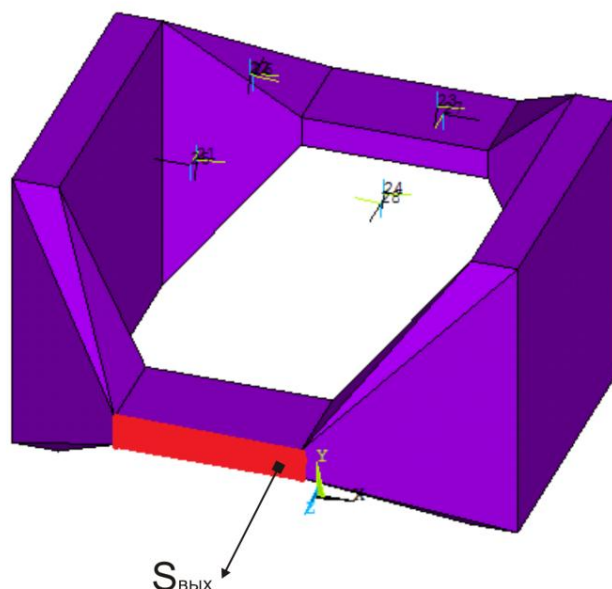


Рисунок 48 – Площадь сечения выходной части канала

[изъят 1 абзац]

### **3.3 Сравнение результатов математического и физического моделирования насоса трансформаторного типа**

[изъято 2 страницы]

### **3.4 Выводы по главе**

[изъят 1 абзац]

## **4 Рекомендации**

[изъята 1 страница]

## Заклучение

[изъята 1 страница]

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бааке Э., Луи С., Первухин М.В, Тимофеев В.Н, Хацаюк М.Ю МГД технологии. Интенсивный курс. Специализация 4. Санкт-Петербург, 2013.– 250с.
2. Фризен В.Э., Индукционные комплексы для инновационных электрометаллургических технологий. ФГАОУ ВПО УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ. Екатеринбург, 2014 – 316 с.
3. Российская конференция по Магнитной Гидродинамике. Сборник тезисов. Россия, Пермь, 2012. – 110 с.
4. Горемыкин В.А. Численное моделирование электромагнитного лотка для транспортировки расплавов алюминия. Красноярск, – 2015.
5. Колачёв Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МСИС, 2005. – 432 с.
6. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
7. Induction pump for high-temperature molten metal using rotating twisted magnetic field: Molten gallium experiment
8. Спиридонов М.А. Гидродинамика в металлургии. Уч. Пособие. Екатеринбург, 2007. – 54 с.
9. Бааке Э., Луи С., Первухин М.В, Тимофеев В.Н, Хацаюк М.Ю МГД технологии. Интенсивный курс. Специализация 4. Санкт-Петербург, 2013.– 250с.
10. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд., испр. М.: «Наука», – 1988.– 512 с.
11. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1, М.: Наука, –1970. 492 с.
12. Спиридонов М.А. Гидродинамика в металлургии. Уч. Пособие. Екатеринбург, 2007. – 54 с.
13. Полищук М.Р., Магнито-динамические насосы для жидких металлов. Киев. Наукова думка 1989. – 131 с.
14. Верте Л.А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. Металлургия 1967. – 212 с.
15. Линчевский Б. В. Техника металлургического эксперимента. Изд. 2-е., Металлургия, 1957. – 256 с.
16. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 4-е, Высшая школа, Москва, 1964. – 730 с
17. Смолин Г.К., Федорова С.В. Высокотемпературные МГД – насосы. Сборник научных трудов. Екатеринбург, 2011. – 59 с.
18. Подъяпольский А Н. Как намотать трансформатор. Государственное энергетическое издательство. Ленинград, 1953. – 24 с.
19. Легезина А.А., Лисафин А. Б., Фарнасов Г. А. Электротехника и электроника. Москва, 2011. – 132 с.

20. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Энергия, 1970. – 272с.
21. Холуянов Ф. И. Трансформаторы однофазного и трехфазного тока. Государственное энергетическое издательство. Ленинград, 1943. – 255 с.
22. Хынков А. В. Теория расчета трансформаторов. СОЛОН ПРЕСС, 2004. – 128 с.
23. Ландау Л.Д., Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд., испр. М.: «Наука», – 1988. 512 с.
24. ANSYS. ANSYSHelpsystem.
25. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
26. Остроумов Г.А. Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи. М.: Гостехиздат, 1952.
27. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
28. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989.
29. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications AIAA Journal. 1994. No. 8. pp. 1598-1605.
30. Menter F.R. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2003. No. 4. 625-632.
31. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
32. Горстин А.В. Давление в жидкости и газе. Москва, 1996. – 124 с.