

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

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование специальности

13.03.02.11 «Электротехнологические установки и системы»

профиль подготовки

Индукционный МГД-насос для перекачки жидкого магния

тема

Руководитель	_____	_____ к.т.н. , доцент	<u>С.П. Тимофеев</u>
	подпись, дата	ученая степень, должность	инициалы, фамилия
Выпускник	_____	<u>ФЭ 12-07Б, 071202164</u>	<u>Р. К. Гуляев</u>
	подпись, дата	номер группы, зачетной книжки	инициалы, фамилия

Красноярск 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Обзор публикаций по МГД-насосам.....	5
1.1 Устройство и принцип действия индукционного МГД-насоса.....	5
1.2 Конструкции индукционных МГД насосов.....	7
1.3 Кондукционный МГД-насос.....	10
1.4 Перекачиваемый металл – магний и его сплавы.....	12
1.5 Принцип применения МГД-насосов для перекачки жидкого магния.....	15
1.6 Особенности использования МГД-насосов для перекачки магния.....	16
1.7 Обзор используемых в современной металлургии индукционных МГД-насосов для перекачки жидкого магния.....	18
2 Расчет физических процессов в МГД-насосах.....	25
2.1 Выбор конструкции и постановка задач.....	25
2.2 Расчет электромагнитных характеристик по инженерной методике.....	26
2.3. Тепловой и вентиляционный расчет.....	34
3. Рекомендации по проектированию опытного образца.....	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Магнитная гидродинамика изучает явления при движении электропроводящих газов и жидкостей в магнитном поле. В металлургии электропроводными жидкостями являются жидкие металлы и их сплавы. Воздействуя на жидкие металлы магнитным полем (пульсирующим, вращающимся, бегущим) можно осуществить ряд технологических операций необходимых в металлургических процессах. Устройства, принцип действия которых основан на взаимодействии жидких металлов с магнитным полем, называют магнитогидродинамическими (МГД – устройства), а технологии с МГД – устройствами называют МГД – технологиями.

Транспортирование жидкого металла является неременным звеном технологических процессов в металлургическом и литейном производстве. В то же время эти операции наиболее трудно поддаются механизации и автоматизации и связаны со значительной затратой тяжелого и опасного труда. Усовершенствование этих операций представляет собой одну из актуальнейших задач. Однако эту задачу в большинстве случаев не удается удовлетворительно решить при помощи обычных средств манипулирования с жидким металлом – ковшей, механических стопоров, пневматического давления и т.д. Автоматизация процессов требует более совершенных средств для перемещения жидкого металла и управления его разливкой, т. е. нужна техника, основанная на каком-то новом принципе силового воздействия на расплавленный металл. Новым принципом стало применение МГД устройств для транспортировки жидких металлов. Ведутся постоянные исследования с целью улучшения технических характеристик данных устройств.

Применение магнитогидродинамических устройств в системе транспорта жидких металлов осуществляется достаточно давно. Существенный подъем в данной области наблюдался в период с начала 60-х годов. Это было связано с разработками в области ядерной энергетики. Примерно в то же время началось интенсивное внедрение МГД-техники в металлургию. В частности, получили

распространение МГД-насосы и МГД-дрессели в системах транспорта жидкого металла. Часть разработок того времени работают и по сей день.

Принцип действия МГД устройств основан на использовании электромагнитных сил. Это сила, действующая на проводник с током, помещенный в электромагнитное поле. Направление электромагнитной силы определяется правилом левой руки. Область, в которой возбуждаются электромагнитные силы, называется рабочей зоной. Электрический ток может подводиться к жидкому металлу двумя способами: контактным (кондукционным) и бесконтактным (индукционным). По этому признаку МГД устройства делятся на два типа: индукционные и кондукционные.

## **1 Обзор публикаций по МГД-насосам**

### **1.1 Устройство и принцип действия индукционного МГД-насоса**

Индукционный магнитогидродинамический насос-это электротехнологическое устройство, предназначенное для перемещения жидких металлов в промышленных установках и ядерных реакторах.

Для приведения в движение металла используется бегущее или вращающееся магнитное поле, созданное индуктором и взаимодействующее с полем созданным электрическим током, протекающим по жидкому металлу. Взаимодействие полей создает электромагнитную силу, действующую на металл, приводя его в движение.

Принцип действия индукционного МГД-насоса аналогичен принципу действия асинхронного двигателя. На обмотку индуктора подаётся переменный ток, создаётся магнитное поле. Магнитное поле, пересекая жидкий металл в канале насоса, индуцирует в нем электродвижущую силу. Под действием которой в жидком металле протекает ток, который искажает магнитное поле, увеличивая его энергию, что ведет к возникновению электромагнитной силы, под действием которой металл начинает движение по каналу насоса. Электрическая связь между расплавом и внешней электрической цепью отсутствует, стенки канала неэлектропроводящие. Рабочая зона индукционных МГД насосов может быть цилиндрической или прямоугольной формы. Индуктор выполняется цилиндрическим или плоским. Индукционные насосы подают жидкие щелочные металлы при температурах до 800—1000 °С и выше. Каналы индукционных насосов обычно изготавливают из нержавеющей стали. В зависимости от конструкции индукционные насосы подразделяют на спиральные и линейные. Последние бывают с плоским (прямоугольного сечения) каналом, обозначаемые сокращённо ПЛИН и с цилиндрическим (кольцевого поперечного сечения) каналом, называемые ЦЛИН. Если каналу и индуктору придать кольцевую форму, то получится схема ЦЛИН. Индукционный насос спирального типа отличаются от ЦЛИН главным образом

расположением обмотки индуктора (её витки повернуты в горизонтальной плоскости на  $90^\circ$ ) и наличием в кольцевом канале винтообразной (спиральной) перегородки. Благодаря этому вращающееся магнитное поле индуктора сообщает жидкости поступательное движение вдоль главной оси.

Получение вращающегося и бегущего магнитных полей. Если по двум рамкам, расположенным в перпендикулярных плоскостях, протекают переменные синусоидальные токи  $i_a$  и  $i_b$ , сдвинутые относительно друг друга по фазе на  $90$  градусов, то во внутреннем пространстве рамок образуется вращающееся магнитное поле. Вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля является результатом наложения магнитных полей рамок и вращается с числом оборотов, об/мин

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (1.1.1)$$

где  $f$  - частота токов, Гц;  $p$  - число пар полюсов (при двух рамках  $p=1$ ).

Если рамки находятся в одной плоскости и по ним также протекают электрические токи  $i_a$  и  $i_b$ , то создаваемое рамками результирующее магнитное поле перемещается ("бежит") в плоскости рамок с линейной скоростью, м/с

$$v_1 = 2\tau f, \quad (1.1.2)$$

где  $\tau$  - полюсное деление (при двух рамках полюсное деление равно ширине рамки).

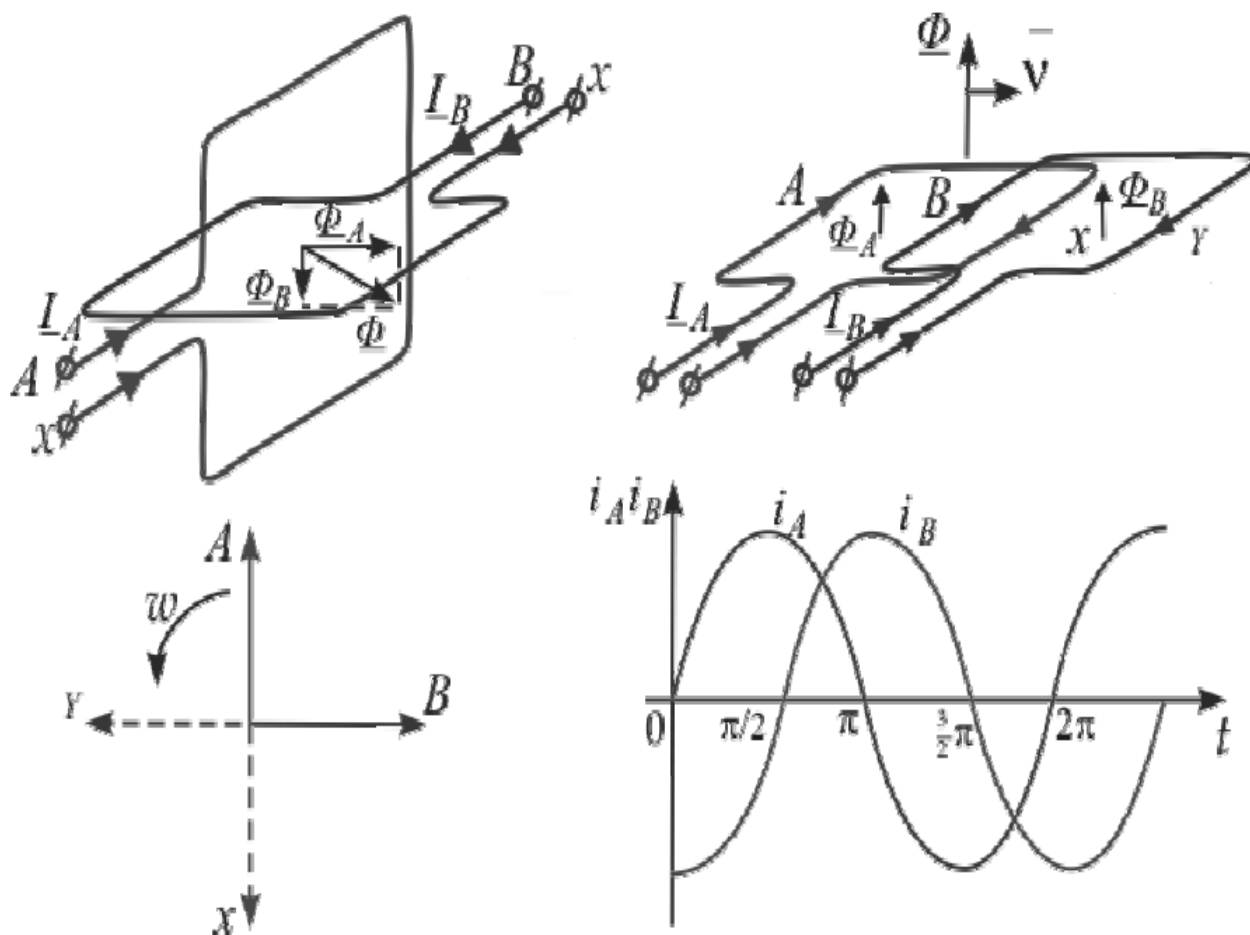


Рисунок 1.1.1 – Получение вращающегося и бегущего магнитных полей в индукционных МГД насосах

## 1.2 Конструкции индукционных МГД насосов

Электромагнитные индукционные насосы для жидких металлов являются одной из разновидностей магнитогидродинамических машин переменного тока. В этих насосах подвижной частью является жидкий металл. Для приведения его в движение используется бегущее или вращающееся магнитное поле, образованное трехфазной обмоткой переменного тока. В зависимости от формы канала, в котором перемещается металл в магнитном поле, электромагнитные индукционные насосы подразделяются на винтовые и линейные.

Винтовой индукционный насос напоминает по своему устройству двигатель с полым ротором. Он также имеет два статора: внешний 1 и внутренний 2. В пазах магнитопровода внешнего статора размещается трехфазная обмотка, питающаяся от сети (иногда трехфазная обмотка

размещается и на внешнем, и на внутреннем статорах). В зазоре между статорами располагается плоская труба из немагнитной стали 4, по которой протекает жидкий металл 3.

На рисунке 2 показана конструкция, в которой труба с жидким металлом делает один виток вокруг внутреннего статора и имеет сечение  $A_1$ , где  $A$  — толщина слоя металла в радиальном направлении — длина магнитопровода и внутренней полости трубы, заполненной жидким металлом в осевом направлении. В общем случае труба с жидким металлом несколько раз винтообразно обвивается вокруг статора. При протекании токов по статорной обмотке образуется вращающееся поле, индуцирующее вихревые токи в жидком проводящем металле 3. За счет взаимодействия вихревых токов с полем создаются электромагнитные силы, заставляющие жидкий металл продвигаться с линейной скоростью  $v$  в сторону вращения поля.

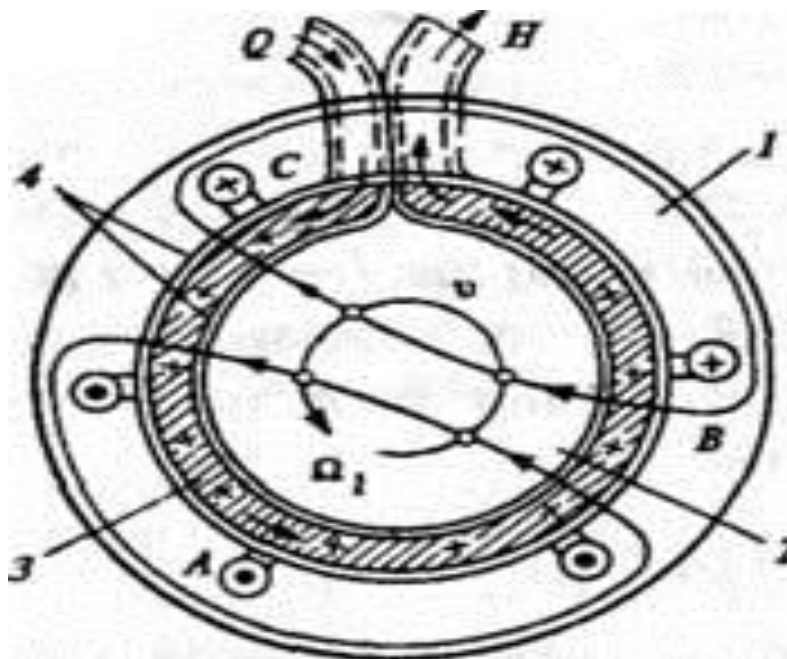


Рисунок 1.2.1 – Винтовой индукционный насос

Процессы преобразования энергии в винтовом одновитковом электромагнитном насосе описываются с помощью уравнений и схемы замещения асинхронного двигателя с полым немагнитным ротором, в которых индуктивное сопротивление рассеяния «ротора» равно.



Плоский линейный индукционный насос напоминает по своему устройству линейную асинхронную машину. Он состоит из двух плоских статоров — индукторов. В пазах индукторов располагаются трехфазные многополюсные обмотки. В зазоре между индукторами размещается плоская труба (канал) прямоугольного сечения, внутреннюю полость которой заполняет жидкий металл. В результате взаимодействия бегущего поля индукторов с вихревыми токами, индуцированными в жидком металле, возникают электромагнитные силы. В результате сложения электромагнитных сил, действующих на частицы металла, развивается давление, и жидкий металл перемещается в направлении движения поля с некоторым скольжением. В отличие от предыдущего создается не вращающееся магнитное поле, а бегущее.

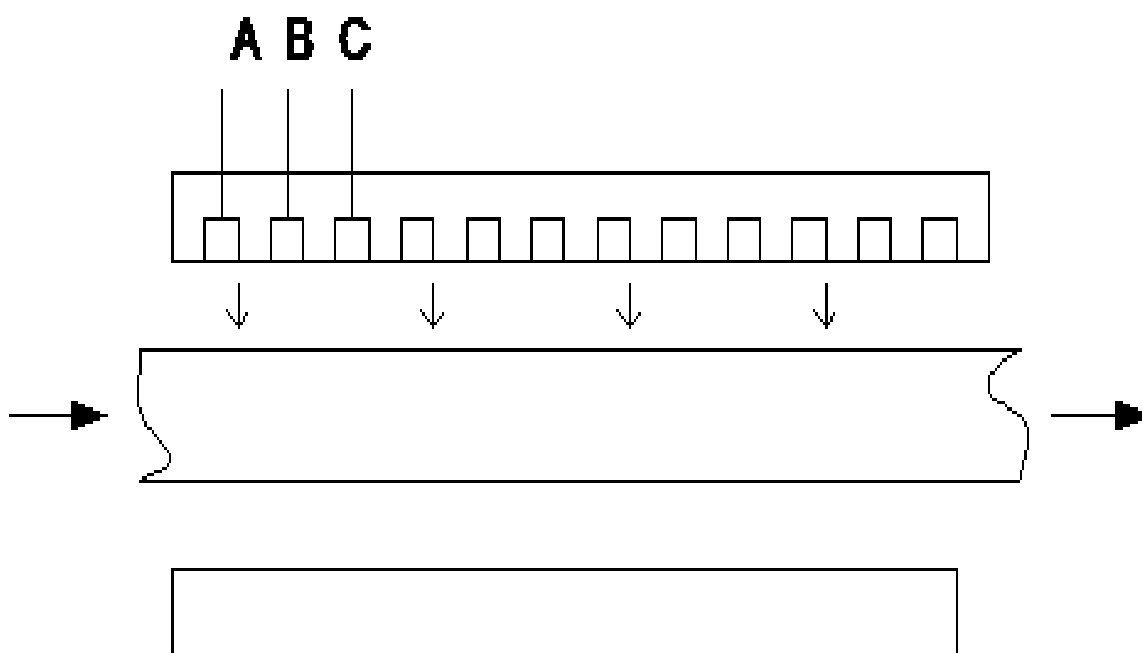


Рисунок 1.2.2 – Плоский линейный индукционный насос

Цилиндрический линейный индукционный насос отличается от предыдущего наличием внутреннего магнитопровода. В цилиндрическом линейном индукционном насосе электромагнитные силы, действующие на жидкий металл, также создаются бегущим полем. Но в таком насосе канал с жидким металлом имеет кольцевое сечение. Внутри канала расположен

сердечник 2 без обмотки, снаружи — индуктор 7, охватывающий канал. В кольцевых пазах индуктора располагаются катушки трехфазной обмотки 5. Достоинства: уменьшается воздушный зазор.

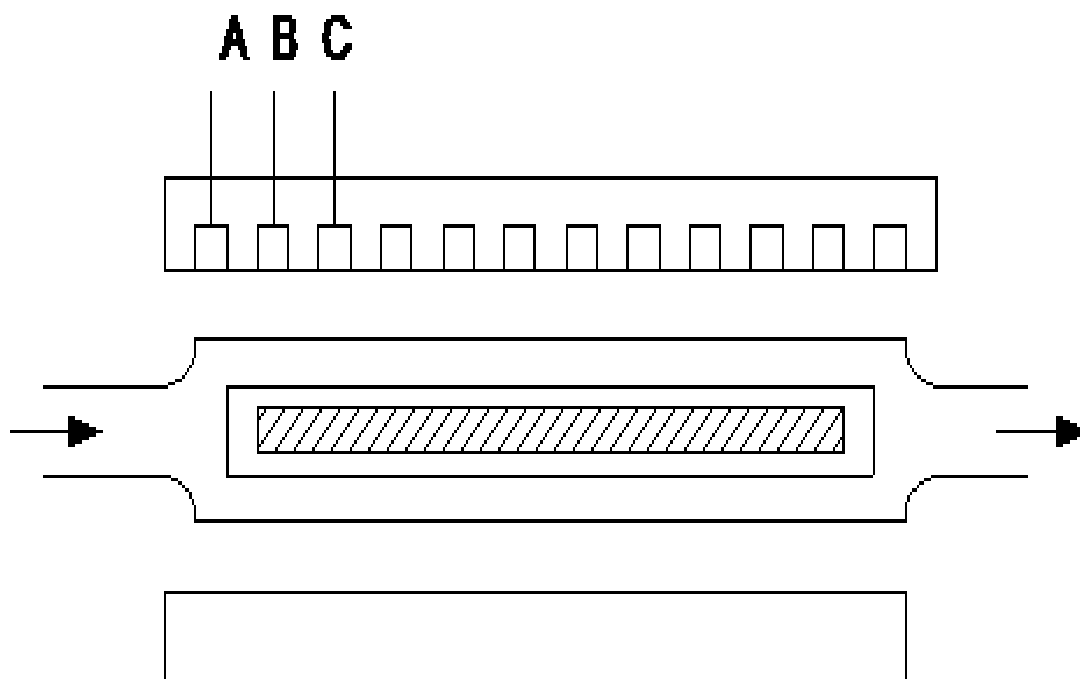


Рисунок 1.2.3 – Цилиндрический линейный индукционный насос

### 1.3 Кондукционный МГД-насос

Кондукционный насос - разновидность магнетогидродинамических насосов, которые подают жидкость в результате воздействия на неё электромагнитной силы, возникающей за счёт взаимодействия магнитного поля, создаваемого магнитной системой насоса, с электрическим током, проходящим через находящуюся в нём жидкость. Кондукционные насосы работают на постоянном и переменном токе.

### Конструкция кондукционного МГД насоса постоянного тока:

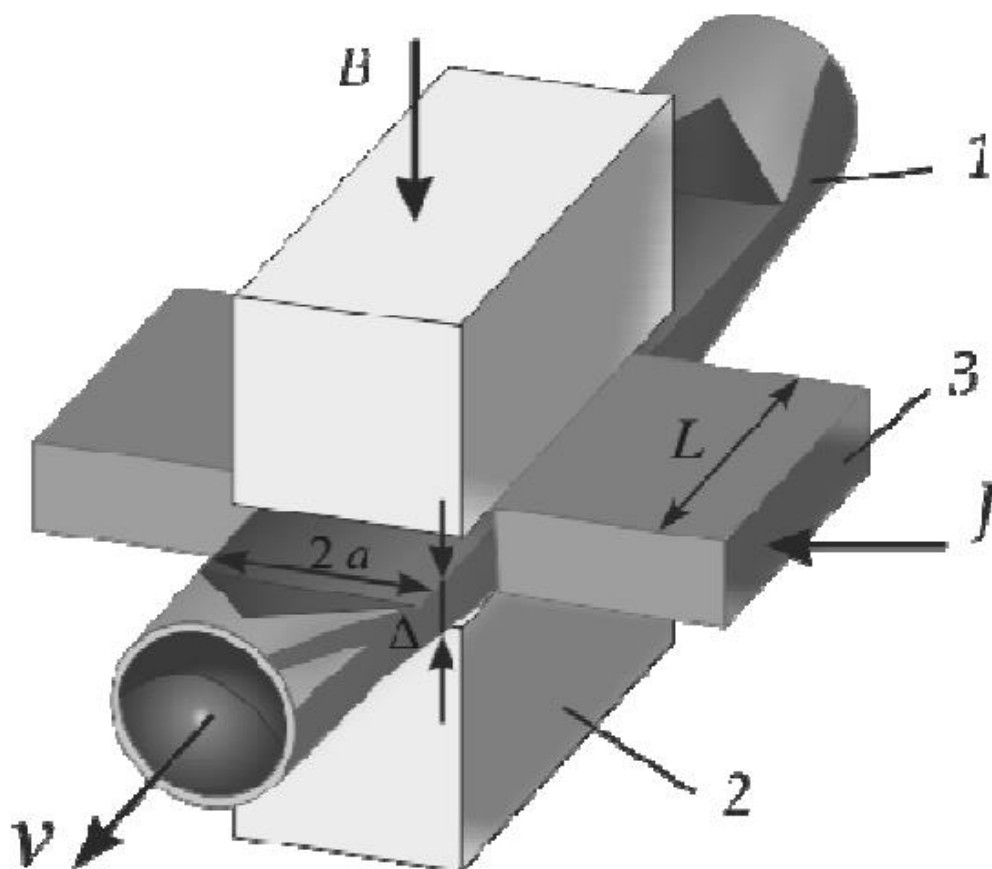


Рисунок 1.3.1 – Устройство кондукционного МГД-насоса

Между полюсами электромагнита 2 расположен канал с жидким металлом 1, к боковым граням которого приварены электроды 3. От внешнего источника к электродам подводится ток, который протекает через жидкий металл между полюсами электромагнита. Канал с жидким металлом 1, токопроводящие электроды 3 и магнитные полюсы 2 расположены таким образом, чтобы направление векторов магнитной индукции, ток в жидком металле и направление движения металла были взаимно перпендикулярны. В этом случае направление электромагнитной силы, по правилу левой руки совпадает с осью канала.

Действие кондукционного насоса переменного тока аналогично действию кондукционного насоса постоянного тока. В этом случае направление тока

будет изменяться в соответствии с изменением силовых линий магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой насоса. Часто эти насосы объединяют с трансформатором в одно устройство, называемое насосом-трансформатором. Кондукционные насосы применяются в промышленности для подачи различных электропроводных жидкостей, в частности при транспортировке и разливке расплавленных металлов.

#### **1.4 Перекачиваемый металл – магний и его сплавы**

Магний — элемент главной подгруппы второй группы, третьего периода периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, с атомным номером 12. Обозначается символом Mg (лат. Magnesium). Простое вещество магний (CAS-номер: 7439-95-4) — лёгкий, ковкий металл серебристо-белого цвета.

Магний — самый легкий конструкционный материал, используемый в промышленных масштабах. Его плотность ( $1,7 \text{ г/см}^3$ ) составляет менее двух третей плотности алюминия. Сплавы магния весят вчетверо меньше стали. Кроме того, магний прекрасно обрабатывается и может быть отлит и переделан любыми стандартными методами металлообработки (прокатка, штамповка, волочение, ковка, сварка, пайка, клепка). Поэтому его основная область применения - в качестве легкого конструкционного металла.

Получение: обычный промышленный метод получения металлического магния — это электролиз расплава смеси безводных хлоридов магния  $\text{MgCl}_2$  (бишофит), натрия  $\text{NaCl}$  и калия  $\text{KCl}$ . В расплаве электрохимическому восстановлению подвергается хлорид магния:



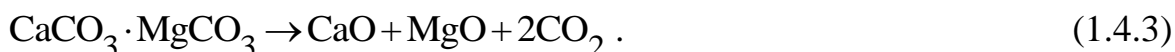
Расплавленный металл периодически отбирают из электролизной ванны, а в неё добавляют новые порции магнийсодержащего сырья. Так как полученный таким способом магний содержит сравнительно много (около 0,1 %) примесей, при необходимости «сырой» магний подвергают

дополнительной очистке. С этой целью используют электролитическое рафинирование, переплавку в вакууме с использованием специальных добавок — флюсов, которые «отнимают» примеси от магния или перегонку (сублимацию) металла в вакууме. Чистота рафинированного магния достигает 99,999 % и выше.

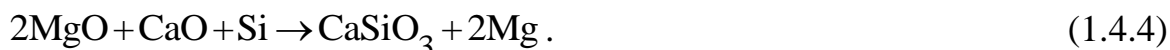
Разработан и другой способ получения магния — термический. В этом случае для восстановления оксида магния при высокой температуре используют кремний или кокс:



Применение кремния позволяет получать магний из такого сырья, как доломит, не проводя предварительного разделения магния и кальция. С участием доломита протекают реакции, вначале производят обжиг доломита:



Затем сильный нагрев с кремнием:



Преимущество термического способа состоит в том, что он позволяет получать магний более высокой чистоты. Для получения магния используют не только минеральное сырьё, но и морскую воду.

Физические свойства: Магний — металл серебристо-белого цвета с гексагональной решёткой, обладает металлическим блеском; пространственная группа  $P 6_3/mmc$ , параметры решётки  $a = 0,32029$  нм,  $c = 0,52000$  нм,  $Z = 2$ . При обычных условиях поверхность магния покрыта прочной защитной плёнкой оксида магния  $\text{MgO}$ , которая разрушается при нагреве на воздухе до примерно  $600^\circ\text{C}$ , после чего металл сгорает с ослепительно белым пламенем с образованием оксида и нитрида магния  $\text{Mg}_3\text{N}_2$ . Скорость воспламенения магния намного выше скорости одёргивания руки, поэтому при поджоге магния человек не успевает одёрнуть руку и получает ожог. Плотность магния при

20 °С — 1,738 г/см<sup>3</sup>, температура плавления металла  $t_{\text{пл}} = 650$  °С, температура кипения  $t_{\text{кип}} = 1090$  °С<sup>[2]</sup>, теплопроводность при 20 °С — 156 Вт/(м·К). Магний высокой чистоты пластичен, хорошо прессуется, прокатывается и поддается обработке резанием.

Химические свойства: При нагревании на воздухе магний сгорает с образованием оксида и небольшого количества нитрида. При этом выделяется большое количество теплоты и световой энергии:



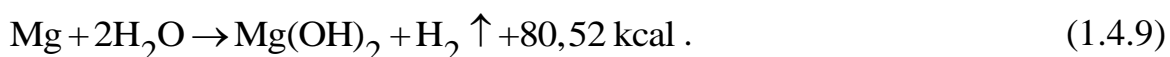
Магний может гореть даже в углекислом газе:



Раскаленный магний энергично реагирует с водой, вследствие чего горящий магний нельзя тушить водой:



Возможна также реакция:



Щелочи на магний не действуют, в кислотах он растворяется с бурным выделением водорода:



Магний со взрывом реагирует с сильными окислителями типа порошкового перманганата калия.

## 1.5 Принцип применения МГД-насосов для перекачки жидкого магния

Магнитогидродинамические насосы применяют для принудительной подачи магниевых сплавов по металлотрактору из ванны печи в разливочную машину (рисунок 1.5.1), это связано с тем, что магний обладает высокой химической активностью по отношению к кислороду. При достижении некоторой предельной температуры магний при взаимодействии с кислородом загорается.

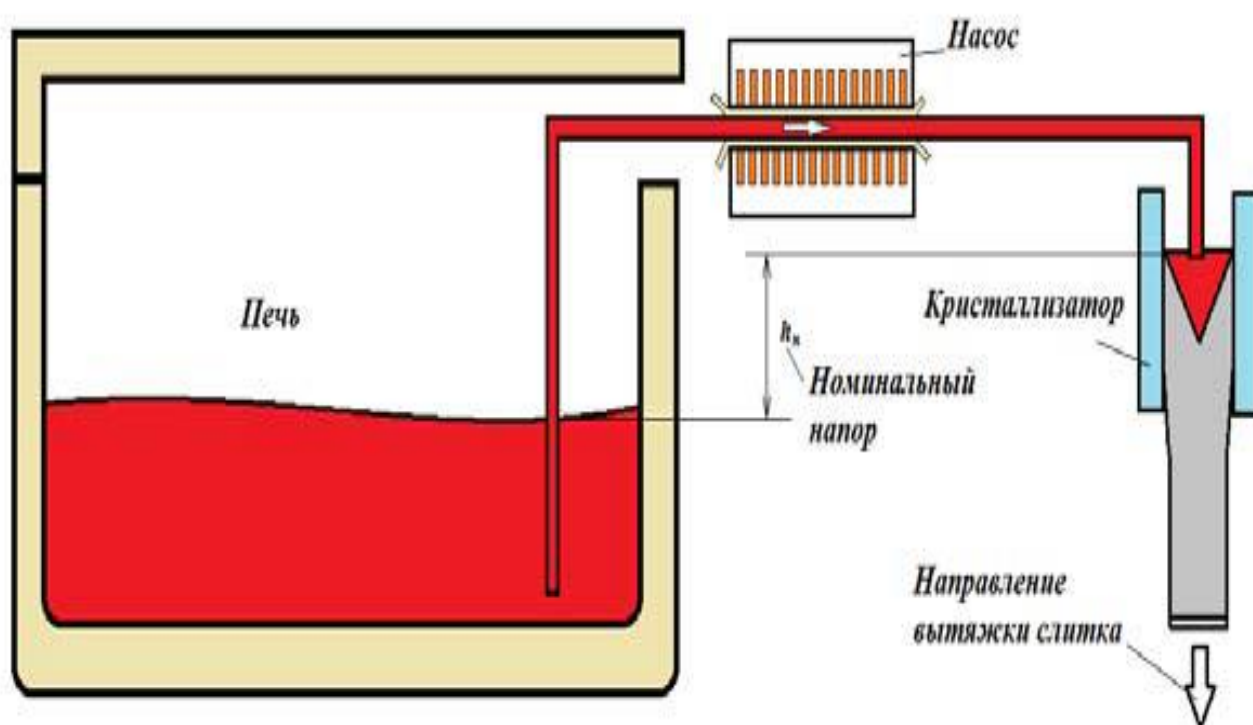


Рисунок 1.5.1 – Схема технологического процесса получения слитка магниевого сплава

МГД-насос используемый для перекачки жидкого магния должен отвечать ряду характерных особенностей. В связи с тем, что магний обладает высокой химической активностью и склонностью к окислению и возгоранию необходимо в процессе перекачки обеспечить отсутствие контакта жидкого магния с кислородом и водородом. Конструкция насоса не должна допускать попадания воды и воздуха в каналы. Канал насоса должен легко очищаться от железной окалины, при соприкосновении с которой в жидком магнии

начинается термическая реакция с большим выделением тепла. Основываясь на этих требованиях, большую эффективность и востребованность при плавке магния получили индукционные МГД-насосы. Бесконтактное наведение токов в жидком металле обеспечивает более высокую надежность и чистоту технологического процесса. Это обеспечивает не только получение качественных слитков металла, но и обеспечивает более безопасные условия труда и соблюдение техники безопасности.

Преимущества индукционного магнитогидродинамического насоса:

1. Высокий термический и гидродинамический КПД благодаря эффективной подаче 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. Высокий коэффициент мощности индуктора.
6. Простая, надежная и удобная для охлаждения, замены и ремонта конструкция обмоток индуктора.

### **1.6 Особенности использования МГД-насосов для перекачки магния**

Современное состояние производства магниевых сплавов с применением МГД-насосов характеризуется довольно высоким уровнем брака, обусловленного выходом из строя МГД-насоса в процессе отливки. Выход насосов из строя, в большинстве случаев, обусловлен разрушением теплоизоляции обмоток насоса с последующим перегоранием обмоток МГД-насоса. Поскольку смена поврежденного насоса на исправный занимает определенное время, за которое поверхность полученного слитка успевает остыть, то продолжение заливки неизбежно приводит к возникновению дефектов литья. По этой причине при выходе из строя МГД-насоса заливка



прекращается, а такой неполный слиток вынимается из машины и пускается в повторную переплавку. Для решения данной проблемы встает вопрос разработки МГД-насосов с применением новейших материалов и современных методов обработки металла, способных привести к снижению стоимости производства и увеличению срока эксплуатации.

На сегодняшний момент появились современные тепло- и электроизоляционные материалы, способные выдерживать более высокие температуры, чем их аналоги на устаревших МГД-насосах. Появились современные методы обработки металлов при помощи лазерной резки, которые существенно снижают себестоимость производства штучных опытно-промышленных образцов. Появляется возможность изготовления обмоток непосредственно вырезанием из листа металла с применением технологии гидроабразивной резки, способствующая снижению расхода металла за счет уменьшения лобовых частей и простоте установки в магнитопровод. Современным подходом к моделированию процессов в сложных взаимосвязанных системах является компьютерное моделирование. Этот подход позволяет существенно снизить затраты на изготовление опытных образцов проектируемых устройств, предсказать поведение системы в различных режимах и оптимизировать конструкцию проектируемого устройства, не прибегая к изготовлению прототипа. Сложившейся тенденцией стало применение коммерческих пакетов компьютерного моделирования, использующих метод конечных элементов для решения широкого спектра взаимосвязанных задач. К таким компьютерным пакетам можно отнести используемые в настоящее время Comsol Multiphysics, Ansys. Для решения многих несложных задач можно использовать отечественный пакет Elcut. Эти пакеты позволяют в большинстве случаев производить моделирование сложных процессов в 2D и 3D постановках при минимальном количестве допущений. При очевидных достоинствах такого подхода (высокая точность и достоверность вычислений, удовлетворительная скорость вычислений, при

достаточно высокой производительности компьютерной техники и т.д.) можно отметить и существенные недостатки:

- использование универсальных компьютерных пакетов, таких как Ansys и Comsol, предполагает наличие достаточно высокой квалификации пользователей в области специальных разделов математики, что отсекает широкий круг возможных пользователей этих компьютерных пакетов;
- существенный рост времени вычисления при усложнении модели, например, при устранении допущений, связанных с нелинейными свойствами материалов, или добавлении связей между модулями расчета полей различной физической природы;
- высокая стоимость как самих пакетов, так и компьютерного оборудования, предназначенного для высокопроизводительных вычислений (суперкомпьютер).

Приведенные недостатки делают вышеназванные пакеты доступными в основном для крупных коллективов НИИ, или для фирм, специализирующихся на решении подобных задач. Промежуточное положение между “тяжелыми” пакетами и инженерными методиками занимают методы приближенных вычислений, основанные на методе детализированных схем замещения. Поэтому разработка универсальных методов компьютерного моделирования электромагнитных и тепловых процессов в МГД-насосах, позволяющих находить оптимальные конструкции и режимы работы, является актуальной задачей.

### **1.7 Обзор используемых в современной металлургии индукционных МГД-насосов для перекачки жидкого магния**

Патент №2106735 Винтовой электромагнитный насос

Авторы патента: Радкевич Николай Александрович

Винтовой электромагнитный насос содержит сквозной канал 3 и магнитную систему 1. Канал включает коаксиальные стенки: наружную 4 и внутреннюю 5. Между стенками 4,5 размещена винтовая перегородка 6.

Перегородка из электроизоляционного материала. Внутренняя и наружная стенки канала подключены к источнику электроэнергии. Магнитная система выполнена в виде соленоида 1. Соленоид 1 содержит внешний ферромагнитный экран 2. Стенки канала выполнены из немагнитного материала.

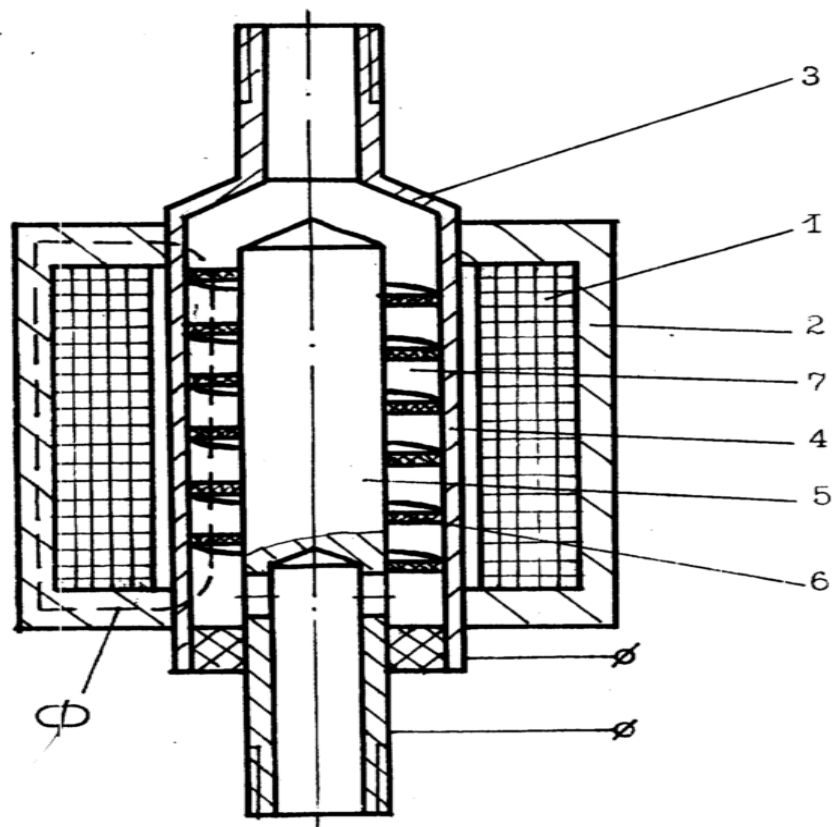


Рисунок 1.7.1 – Винтовой электромагнитный насос

Насос работает следующим образом. При подаче напряжения на наружную стенку 4 относительно внутренней 5, в рабочей жидкости, протекающей по винтовому каналу 7, возникает ток, направление которого перпендикулярно силовым линиям магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого соленоидом 1. В результате взаимодействия тока с магнитным полем возникающая электромагнитная сила согласно правилу левой руки перемещает жидкость по винтовому каналу 7. Так как результирующая сила, действующая на жидкость, достаточно близко совпадает с направлением винтового канала, то эти силы будут суммироваться, создавая напор в канале. Одновременно протекающий в стенках канала ток нагревает проходящую по винтовому каналу

жидкость. Необходимо отметить, что заявленное устройство может работать как на постоянном токе, так и на переменном при условии совпадения фаз тока в обмотке соленоида и в жидкости. При этом магнитная система при работе на постоянном токе может быть выполнена с применением постоянных магнитов. Для исключения шунтирования магнитного потока наружная и внутренняя стенки канала могут быть выполнены немагнитными.

Задачей изобретения является создание универсальной конструкции, имеющей однофазную магнитную систему и позволяющей перекачивать различные по температуре и электрофизическим свойствам жидкости, а также расширение функциональных возможностей за счет выполнения насосом дополнительной функции - нагревателя жидкости. Поставленная задача решается предложенным винтовым электромагнитным насосом. Как и известное устройство (прототип), он содержит магнитную систему, внутри которой расположен сквозной винтовой канал для прохождения рабочей среды. Канал образован коаксиально расположенными наружной и внутренней стенками, между которыми размещена винтовая перегородка. Отличие от прототипа заключается в выполнении наружной и внутренней стенок канала в виде электродов, а винтовой перегородки - в виде изолятора (т.е. электроизоляционной). В частном случае для уменьшения шунтирования магнитного поля, создаваемого магнитной системой, наружная и внутренняя стенки выполнены из немагнитного материала. При таком исполнении, с одной стороны, отпадает необходимость в многофазной магнитной системе и внутреннем магнитопроводе магнитная система может быть выполнена, например, в виде соленоида с внешним ферромагнитным экраном или без него. А с другой стороны, это устройство можно применять для нагрева и перемещения жидкостей в широком диапазоне по электрофизическим свойствам (вода, растворы, электролиты, расплавы и т.д.). Основным недостатком этого устройства можно считать ограниченность его применения, так как с его помощью можно лишь регулировать поток жидкого металла.

Патент №2282932 Погружной индукционный цилиндрический насос

Авторы патента: Дрыгина Тамара Алексеевна, Драгунов Юрий Григорьевич, Анисимов Евгений Павлович, Вахрушин Михаил Петрович, Степанов Владимир Сергеевич.

Изобретение относится к индукционным цилиндрическим насосам, обеспечивающим электромагнитное силовое воздействие на жидкометаллический теплоноситель рабочего канала. Насос имеет герметичный корпус с расположенным в нем индуктором, содержащим обмотку и магнитопровод, узел компенсации, герметичный сердечник, набранный из листов продольно-шихтованной электротехнической стали, являющийся ярмом для замыкания магнитного потока, дистанцеры и скользящую опору. Рабочий канал образован тонкостенными обечайками герметичного индуктора и внутреннего сердечника. Узел компенсации выполнен в виде сильфонной вставки. Технический результат заключается в компенсации различных относительных термических расширений корпуса и наружной обечайки рабочего канала, что обеспечивает герметичность индуктора.

Предшествующий уровень техники: известен индукционный цилиндрический насос (патент Англии №1417210), используемый для перекачки жидкометаллического теплоносителя по трубопроводам, состоящий из полого ферритового сердечника, корпуса с внешней обмоткой и шести пакетов магнитопровода и рабочего канала, образованного концентрически расположенными обечайкой сердечника и обечайкой корпуса. Недостатком этого решения является негерметичность статора, т.е. невозможность использования этого насоса в погружном варианте. Наиболее близким техническим решением из известных является индукционный цилиндрический насос НА-2 (Г.А.Баранов и др. «Расчет и проектирование индукционных МГД - машин с жидкометаллическим рабочим телом»), для перекачки жидкометаллического теплоносителя натрий - калий, содержащий три основных узла: статор, неподвижный ротор и рабочий канал. Статор состоит из

восьми пакетов магнитопровода с пазами для пятидесяти четырех дисковых катушек первичной обмотки. Ротор состоит из остова и двадцати четырех пакетов магнитопровода, набранных из электротехнической стали толщиной 0,5 мм и уложенных в пазы, профрезированные в остове. Рабочий канал образован двумя концентрически расположенными трубами, выполненными из нержавеющей стали толщиной 2 мм. Недостатком этого конструктивного решения является негерметичность статора, а следовательно, и обмотки, т.е. невозможность использования этого насоса в погружном варианте.

Раскрытие изобретения: целью настоящего изобретения является создание конструкции погружного индукционного насоса. Задачей изобретения является создание герметичного индуктора. Технический результат изобретения заключается в возможности его применения в баковых вариантах реакторных установок, в которых отсутствуют трубопроводы. Это достигается тем, что насос имеет герметичный внешний индуктор, состоящий из обмотки и магнитопровода, набранного из пакетов продольно-шихтованной электротехнической стали. В хвостовой части корпуса насоса имеет узел компенсации различных термических расширений корпуса и внешнего индуктора и одновременно обеспечивающий герметичность последнего. Охлаждение индуктора организовано путем стока тепла в теплоноситель, протекающий по рабочему каналу, и в теплоноситель, находящийся снаружи насоса. Для улучшения теплопроводности все пустоты и щели в конструкции индуктора заполнены высокотемпературным компаундом. Сердечник также является герметичной конструкцией и состоит из продольно-шихтованных листов электротехнической стали, которые закреплены на стяжном круглом стержне. Снаружи сердечник облицован тонколистовой нержавеющей сталью. Сердечник является ярмом для замыкания магнитного потока.

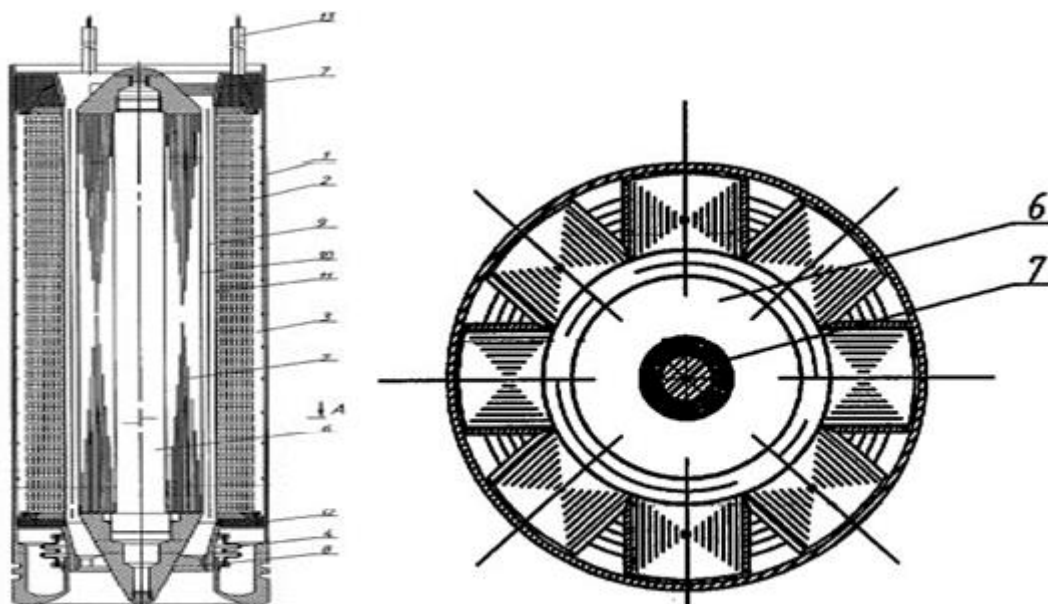


Рисунок 1.7.2 – Погружной индукционный цилиндрический насос

Патент №2289187 Цилиндрический линейный индукционный насос

Авторы патента: Кириллов Игорь Рафаилович, Огородников Анатолий Петрович, Беляков Вячеслав Петрович, Преслицкий Геннадий Венедиктович.

Изобретение направлено на решение задачи уменьшения пульсаций давления с двойной частотой источника электропитания, повышения развиваемого давления и коэффициента полезного действия за счет расположения на выходном конце насоса дополнительного шунтирующего участка. Это достигается тем, что в известном электромагнитном насосе, содержащем трехфазную обмотку с постоянным числом витков по длине насоса и магнитопровод с явно выраженными шунтирующими участками, шунтирующий участок, расположенный на выходе насоса, имеет большую длину, чем на входе. Причем длина его не менее длины фазной зоны и не более полюсного деления  $\tau$ . Как показали теоретические и экспериментальные исследования пульсаций давления с двойной частотой источника электропитания и исследования напор расходных характеристик насоса с расположением шунтирующих зон на входе, на выходе и одновременно на входе и выходе, при расположении шунтирующей зоны на выходе в соответствии с предлагаемым техническим решением удастся снизить

пульсации давления с двойной частотой источника электропитания в 2-3 раза и повысить кпд насоса на 3-5% по сравнению с насосом, имеющим шунтирующую зону на входе той же длины. Таким образом, в электромагнитном линейном индукционном насосе за счет расположения дополнительной шунтирующей зоны на выходе можно снизить пульсации давления с двойной частотой источника электропитания, увеличить развиваемое насосом давление и повысить его кпд. Цилиндрический линейный индукционный насос, содержащий канал, внутренний и наружный магнитопроводы, в пазах наружного магнитопровода уложена трехфазная обмотка возбуждения с одинаковым расположением фазных зон на парах полюсов и он выполнен с шунтирующими участками на его концах, отличающийся тем, что на выходном конце наружного магнитопровода выполнен шунтирующий участок увеличенной длины по сравнению с шунтирующим участком на его входном конце.

Индукционный насос, показанный на рисунке 9, содержит наружный магнитопровод 1, в пазах которого уложена трехфазная обмотка 2. Внутренний магнитопровод 3 охвачен наружной тонкостенной обечайкой 4 и внутренней тонкостенной обечайкой 5, охватывающей внутренний магнитопровод. Обечайки, наружная 4 и внутренняя 5, образуют кольцевой канал 6.

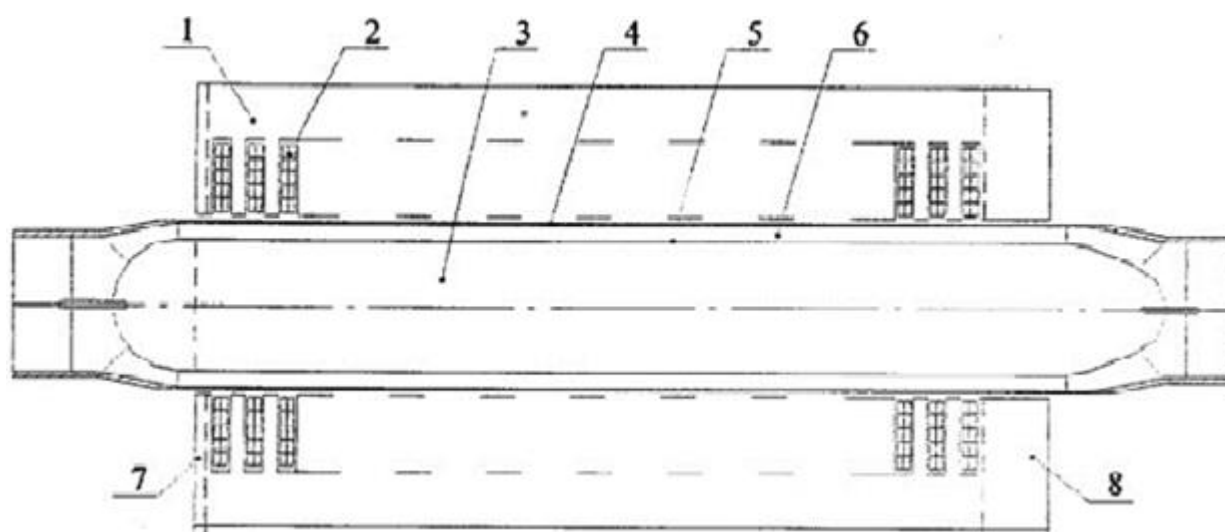


Рисунок 1.7.3 – Цилиндрический линейный индукционный насос



## **2 Расчет физических процессов в МГД-насосах**

### **2.1 Выбор конструкции и постановка задач**

В главе 1 описаны основные виды МГД-насосов для перекачки жидкого магния. Недостатками кондукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом являются: большая величина рабочего тока (сотни тысяч ампер) при малом рабочем напряжении (до 3 В); необходимость применения токопроводящих металлических стенок каналов; трудности в подводе больших токов к жидкому металлу. Основное положительное свойство кондукционных устройств – возможность получения больших плотностей электродинамических сил, действующих на проводящую среду. Характерной особенностью индукционных плоских машин является наличие у них поперечного краевого эффекта в распределении вторичных токов. Устранение поперечного краевого эффекта достигается при изготовлении цилиндрической МГД – машины, однако недостатком данных МГД-насосов является сложность в замене металлотракта при его зарастании в процессе эксплуатации. На основании проведенного анализа сделан вывод, что для перекачки жидкого магния наиболее приемлемой является конструкция плоского линейного индукционного насоса. Это связано с отсутствием необходимости токоподвода к жидкому металлу, а также с отсутствием необходимости подвода больших рабочих токов. В отличие от цилиндрических МГД-насосов в плоских индукционных МГД – насосах есть возможность быстрой замены металлотракта при его зарастании.

На основании вывода для данного исследования была выбрана конструкция плоского линейного индукционного насоса. Плоский насос конструктивно состоит из двух плоских статоров-индукторов, в пазах которых размещены трехфазные многополюсные обмотки. В зазоре между индукторами расположен плоский канал прямоугольного сечения, его внутреннюю полость заполняет жидкий металл. Пазы имеют прямоугольное сечение, в них располагается обычно до нескольких десятков обмоток. Обмотка – медная,

проволочная, круглого сечения. Индуктор рассчитывается на питание промышленной частоты 50Гц и на напряжение 220В или 380В. Преимуществом данной конструкции насосов является, прежде всего, лучшее охлаждение токоведущих частей и как следствие уменьшается вероятность перегрева всего насоса, что обеспечивает более длительный срок службы. Повышается качество магния и сплавов. Проектирование конструкций плоских линейных индукционных насосов учитывающей технологические особенности и позволяющие повысить срок службы и КПД насосов является актуальной задачей.

## **2.2 Расчет электромагнитных характеристик по инженерной методике**

Основные исходные данные:

Жидкий металл – магний.

Температура жидкого металла:  $700^{\circ}\text{C}$ .

Удельное сопротивление:  $\rho = 4,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Удельный вес:  $\sigma = 1,74 \text{ г} / \text{см}^3$ .

Заданная производительность:  $N = 4 \text{ тонн} / \text{час}$ .

Заданное давление:  $D = 0,71 \text{ кг} / \text{см}^2$ .

Параметры, принятые на основании предварительных расчетов:

Число пар полюсов:  $p = 1$ .

Полюсный шаг обмотки:  $\tau = 50$ .

Ширина канала трубы:  $s_2 = 30 \text{ см}$ .

Высота канала трубы:  $\Delta = 2 \text{ см}$ .

Воздушный зазор индуктора:  $\delta = 6 \text{ см}$ .

Число пазов на полюс и фазу:  $q = 4$ .

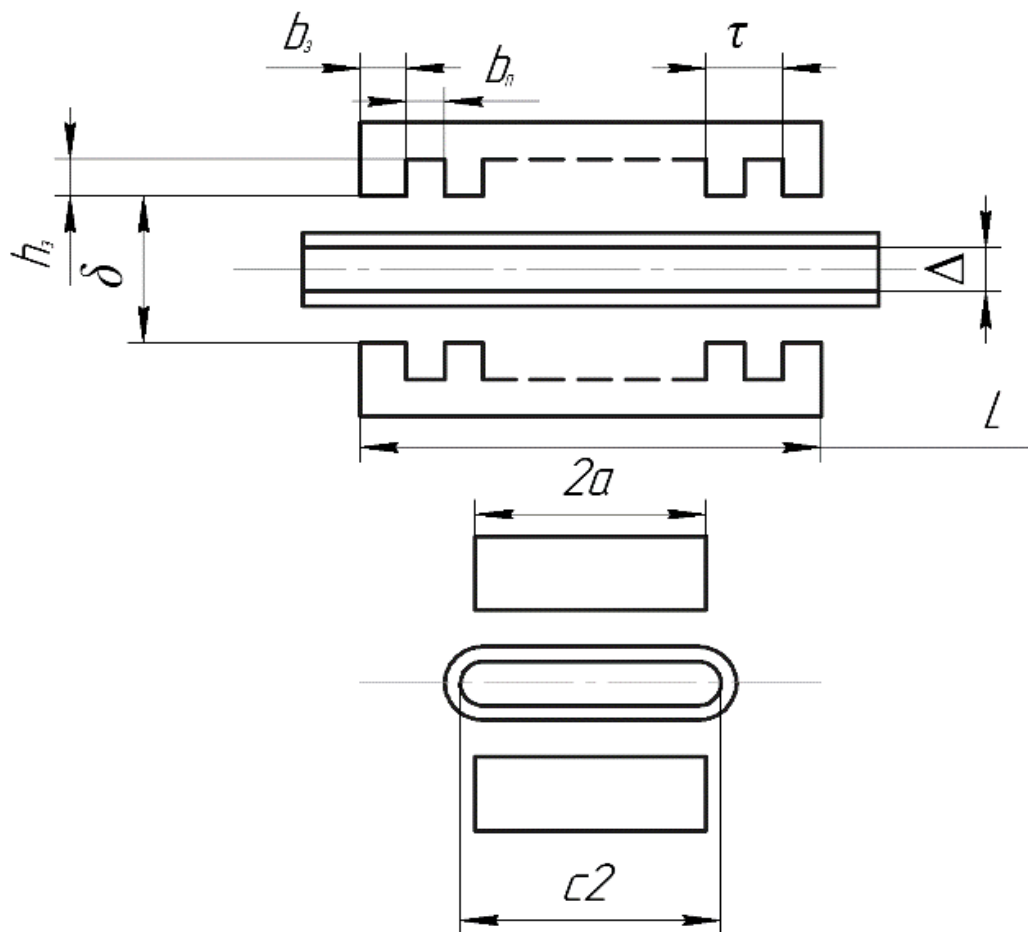


Рисунок 2.2.1 – Расчетная модель МГД-насоса

Толщина футеровки и теплоизоляции канала на сторону равна 1,5 см.

Частота питающего тока  $f = 50 \text{ Гц}$ .

На основе исходных данных проводим расчет электромагнитных характеристик:

Скорость движения бегущего магнитного поля, см/сек

$$v_c = 2 \cdot \tau \cdot f = 5000. \quad (2.2.1)$$

Скорость движения жидкого металла, см/сек

$$v_M = \frac{N \cdot 10^6}{3600 \cdot \sigma \cdot c2 \cdot n} = 10,643. \quad (2.2.2)$$

Величина скольжения

$$S = \frac{v_c - v_M}{v_c} = 0,998. \quad (2.2.3)$$

Расчетная длина индуктора, см

$$l = 2\pi r = 100. \quad (2.2.4)$$

Коэффициент, определяющий влияние индуктивности вторичного контура

$$\varepsilon = \frac{8f \cdot S \cdot \Delta \cdot \tau^2 \cdot 10^{-9}}{\rho \cdot \delta} = 773,544. \quad (2.2.5)$$

Коэффициенты  $K_a$  и  $K_p$ , учитывающие ослабление давления от поперечного краевого эффекта и реакции вторичной цепи (жидкого металла) будут равны  $K_a = 0,4$  и  $K_p = 0,3$

Коэффициент, учитывающий рассеяние рабочего магнитного потока

$$K_{\Pi} = \cosh\left(\frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \tau}\right) = 1,018. \quad (2.2.6)$$

Необходимая индукция магнитного поля в жидком металле, Гс

$$B = \sqrt{\frac{9.81 \cdot D \cdot \rho \cdot 10^{14}}{\tau \cdot l \cdot f \cdot S \cdot K_a \cdot K_{\Pi p}}} = 57,748, \quad (2.2.7)$$

где  $K_{\Pi p} = 0,9$  – эмпирический коэффициент, учитывающий уменьшение давления вследствие нескомпенсированной части продольного краевого эффекта.

Индукция на активной поверхности железа индуктора, Гс

$$B_0 = K_{\Pi} \cdot B = 58,777. \quad (2.2.8)$$

Магнитный поток через полюс, Мкс

$$\Phi_0 = \frac{4 \cdot B_0 \cdot \tau \cdot c}{\pi} = 7,484 \cdot 10^4. \quad (2.2.9)$$

Число последовательных витков на фазу обмотки

$$\omega = \frac{220 \cdot 10^8}{4.44 \cdot K_e \cdot K_{об} \cdot f \cdot \Phi_0} = 577,823. \quad (2.2.10)$$

Обмоточный коэффициент

$$K_{об} = \frac{\sin 30^\circ}{q \cdot \left(\sin \frac{30^\circ}{q}\right)} = 0,958. \quad (2.2.11)$$

Магнитодвижущая сила на один полюс

$$F = K_\delta' \cdot K_\delta'' \cdot K_\delta''' \cdot \delta \cdot B = 372,51, \quad (2.2.12)$$

где

$$K_\delta' = \frac{t_z}{t_z - \theta \cdot \frac{\delta}{2}} = 1,042; \quad (2.2.13)$$

$$K_\delta'' = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \tau}\right)}{\frac{\pi \cdot \delta}{2 \cdot \tau}} = 1,006; \quad (2.2.14)$$

$$K_\delta''' = \frac{1}{1 - 0.048 \cdot \frac{\delta}{2c}} = 1,007; \quad (2.2.15)$$

$$\theta = \frac{\left(\frac{2 \cdot b_z}{\delta}\right)}{5 + \frac{2 \cdot b_z}{\delta}} = 0,057. \quad (2.2.16)$$

Намагничивающий ток, А

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F}{1.35 \cdot \omega \cdot K_{об}} = 0,499. \quad (2.2.17)$$

Число проводников в пазу

$$S_{\Pi} = \frac{a \cdot \omega}{2 \cdot p \cdot q} = 1,011 \cdot 10^3. \quad (2.2.18)$$

Назначаем размеры паза и сечения проводника:

зубцовый шаг магнитопровода, см

$$t_z = \frac{\tau}{3 \cdot q} = 4,167, \quad (2.2.19)$$

ширина зубца, см

$$b_z = 0,9, \quad (2.2.20)$$

ширина паза, см

$$b_{\Pi} = 2,73, \quad (2.2.21)$$

высота паза, см

$$h_{\Pi} = 1,85. \quad (2.2.22)$$

Проводник – медный провод марки ПЭТВ-2.

В паз укладывается по высоте 6 рядов провода, по 9 в ряду, т. е. 54 проводника.

Индукция в зубцах, Гс

$$B_z = B_0 \cdot \frac{t_z}{b_z} = 272,117. \quad (2.2.23)$$

Активное сопротивление фазы обмотки, Ом

$$r = 2 \cdot \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega + \frac{2 \cdot q \cdot S_n}{a}}{a \cdot S_{\text{пр}}} \cdot (c2 \cdot K_a \cdot \tau) = 0,367, \quad (2.2.24)$$

где

$$\rho_{\text{пр}} = 1,75 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 0,004 \cdot (t_{\text{пр}} - 20)) = 2,065 \cdot 10^{-6}; \quad (2.2.25)$$

$$S_{\text{пр}} = 4,65 \cdot 10^{-2},$$

где  $t_{\text{пр}} = 65^{\circ}\text{C}$  – рабочая температура обмотки, в градусах Цельсия.

Коэффициент  $K_a$  для проволочной обмотки не учитываем в случае малой высоты паза.

Коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей обмотки

$$\lambda_{\text{л}} = \frac{A \cdot q \cdot \tau \cdot (K_{\phi} - 0,64)}{c} = -0,276, \quad (2.2.26)$$

где

$$A = 0,175 \cdot \frac{\delta}{100} = 0,115.$$

Коэффициент проводимости рассеяния по коронкам зубцов

$$\lambda_3 = \left( \frac{1}{2 \cdot \pi} \right) \cdot \left( \ln \left( \frac{\delta^2}{(4 \cdot b_{\text{п}})^2} + \frac{1}{4} \right) + \left( \frac{2 \cdot \delta}{b_{\text{п}}} \right) \tanh \left( \frac{b_{\text{п}}}{\delta} \right) \right) = 0,124. \quad (2.2.27)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния на фазу, Ом

$$x_{\delta} = 0,158 \cdot \left( \frac{f}{100} \right) \cdot \left( \frac{\omega}{100} \right)^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \delta}{p \cdot q} \right) \cdot (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_3) = 1,187, \quad (2.2.28)$$

где

$$\lambda_{\Pi} = \sqrt{(\lambda_3)^2 + (\lambda_{\Pi})^2} = 0,302.$$

Индуктивное сопротивление рабочего потока на фазу, Ом

$$x_{0\mu} = \frac{U}{K_e \cdot I_{\mu}} = 184,367. \quad (2.2.29)$$

Суммарное индуктивное сопротивление, Ом

$$x = x_{\delta} + x_{0\mu} = 185,554. \quad (2.2.30)$$

Полное сопротивление фазы обмотки, Ом

$$z = \sqrt{r^2 + x^2} = 185,555. \quad (2.2.31)$$

Проверка предварительно выбранного значения коэффициента  $K_e$

$$K_e' = \left( \frac{z}{x_{0\mu}} \right) \cdot \left( \frac{10,3}{5,7} \right) = 2,393. \quad (2.2.32)$$

Выбранный ранее коэффициент соответствует расчетному  $K_e' = K_e$ .

Активная мощность вторичной цепи, Вт

$$P_2 = \frac{4 \cdot \Delta \cdot c \cdot 1 \cdot S^2 \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B^2 \cdot K_a \cdot 10^{-16}}{\rho} = 32000. \quad (2.2.33)$$

Реактивная мощность вторичной цепи, Вар

$$Q = \frac{4 \cdot \Delta \cdot c \cdot 1 \cdot S^2 \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B^2 \cdot K_p}{\rho \cdot 10^{16}} = 24000. \quad (2.2.34)$$



Гидравлическая мощность, Вт

$$P_{\text{гидр}} = \frac{4 \cdot \Delta \cdot c^2 \cdot l \cdot S \cdot (1 - S) \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B^2 \cdot K_a}{\rho \cdot 10^{16}} = 1,365 \cdot 10^3. \quad (2.2.35)$$

Приведенный активный ток вторичной цепи (ток потерь в жидком металле), А

$$I_{2a}' = \frac{P_2 \cdot K_e}{3 \cdot U \cdot S} = 116,274. \quad (2.2.36)$$

Приведенный реактивный ток вторичной цепи, А

$$I_{2p} = \frac{Q \cdot K_e}{3 \cdot U \cdot S} = 87,206. \quad (2.2.37)$$

Фазный ток индуктора, А

$$I_1 = \sqrt{(I_{\mu} + I_{2p})^2 + I_{2a}'^2} = 145,643. \quad (2.2.38)$$

Плотность тока в обмотке, А/см<sup>2</sup>

$$j = \frac{I_1}{a \cdot S_{\text{пр}}} = 223,721. \quad (2.2.39)$$

Потери в обмотке индуктора, Вт

$$P_1 = 3 \cdot I_1^2 \cdot r = 23330. \quad (2.2.40)$$

Активная мощность индуктора, Вт

$$P = P_1 + P_2 = 55330. \quad (2.2.41)$$

Кажущаяся мощность, ВА

$$S = 3 \cdot U \cdot I_1 = 96120. \quad (2.2.42)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = 0,576. \quad (2.2.43)$$

Гидравлический КПД, %

$$\gamma_{\text{гидр}} = \frac{P_{\text{гидр}}}{P} \cdot 100\% = 2,5. \quad (2.2.44)$$

Комплексный КПД, %

$$\eta = \frac{P_2 + P_{\text{гидр}}}{P} \cdot 100\% = 60,3. \quad (2.2.45)$$

### 2.3 Тепловой и вентиляционный расчет

Основные исходные данные:

Температура расплава:  $T_p = 700^\circ\text{C}$ .

Температура окружающей среды:  $T_{\text{окр}} = 40^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи стали:  $\alpha_1 = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи футеровки (вата минеральная):  $\alpha_2 = 5,6 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности стали:  $\lambda_1 = 35 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности футеровки:  $\lambda_2 = 0,045 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Толщина металла:  $\delta_1 = 20 \text{ мм}$ .

Толщина футеровки:  $\delta_2 = 15 \text{ мм}$ .

На основе исходных данных проводим тепловой расчет:

Тепловой поток,  $\text{Вт/м}^2$

$$Q = \frac{T_p - T_{\text{окр}}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}} = 1,976. \quad (2.3.1)$$

Температура первого слоя, °C

$$T_1 = T_p - Q \cdot \frac{1}{\alpha_1} = 699,999. \quad (2.3.2)$$

Температура второго слоя, °C

$$T_2 = T_p - Q \cdot \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right) = 698,876. \quad (2.3.3)$$

Температура третьего слоя, °C

$$T_3 = T_p - Q \cdot \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) = 40,353. \quad (2.3.4)$$

Мощность тепловых потерь, Вт

$$Q_{\text{пот}} = 2 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot Q = 1,897. \quad (2.3.5)$$

### 3 Рекомендации по проектированию опытного образца

МГД-насос должен отвечать следующим техническим характеристикам:

- Тип насоса: МГД-насос наружного расположения;
- Водяное охлаждение обмоток: отсутствует;
- Перекачиваемый металл: магний и его сплавы;
- Температура перекачиваемого металла: до 700°С ;
- Рабочее давление: не менее 0,71кг/см<sup>2</sup>;
- Рабочая производительность: не менее 4 тонны магния в час;
- Питание насоса: регулируемый трансформатор – 0...450 В, однофазного тока 50 Гц, мощность не менее 90 кВА;
- Режим работы: непрерывный.

Исходя и вышеперечисленных требований сформировалась конструкция плоского линейного индукционного насоса (ПЛИН), которая применяется в данный момент на ряде металлургических предприятий для литейного производств. Насос представляет собой двухсторонний линейный асинхронный двигатель с жидкометаллическим вторичным элементом, индуктор которого создает бегущее вдоль оси металлотракта поперечное (пронизывающее металлотракт) магнитное поле.

На рисунке 3.1 изображена модель плоского линейного индукционного МГД-насоса. Цифрой 1 обозначен проем в который устанавливается металлотракт, цифрой 2 индуктор расположенный параллельно металлотракту, цифрой 3 обозначен магнитопровод. Насос помещен в защитный корпус, что не является обязательным условием эксплуатации индукционного МГД-насоса. Корпус используется только если этого требуют конкретные условия эксплуатации насоса. Данная модель наглядно показывает устройство и конструкцию индукционного МГД-насоса с плоским линейным каналом.

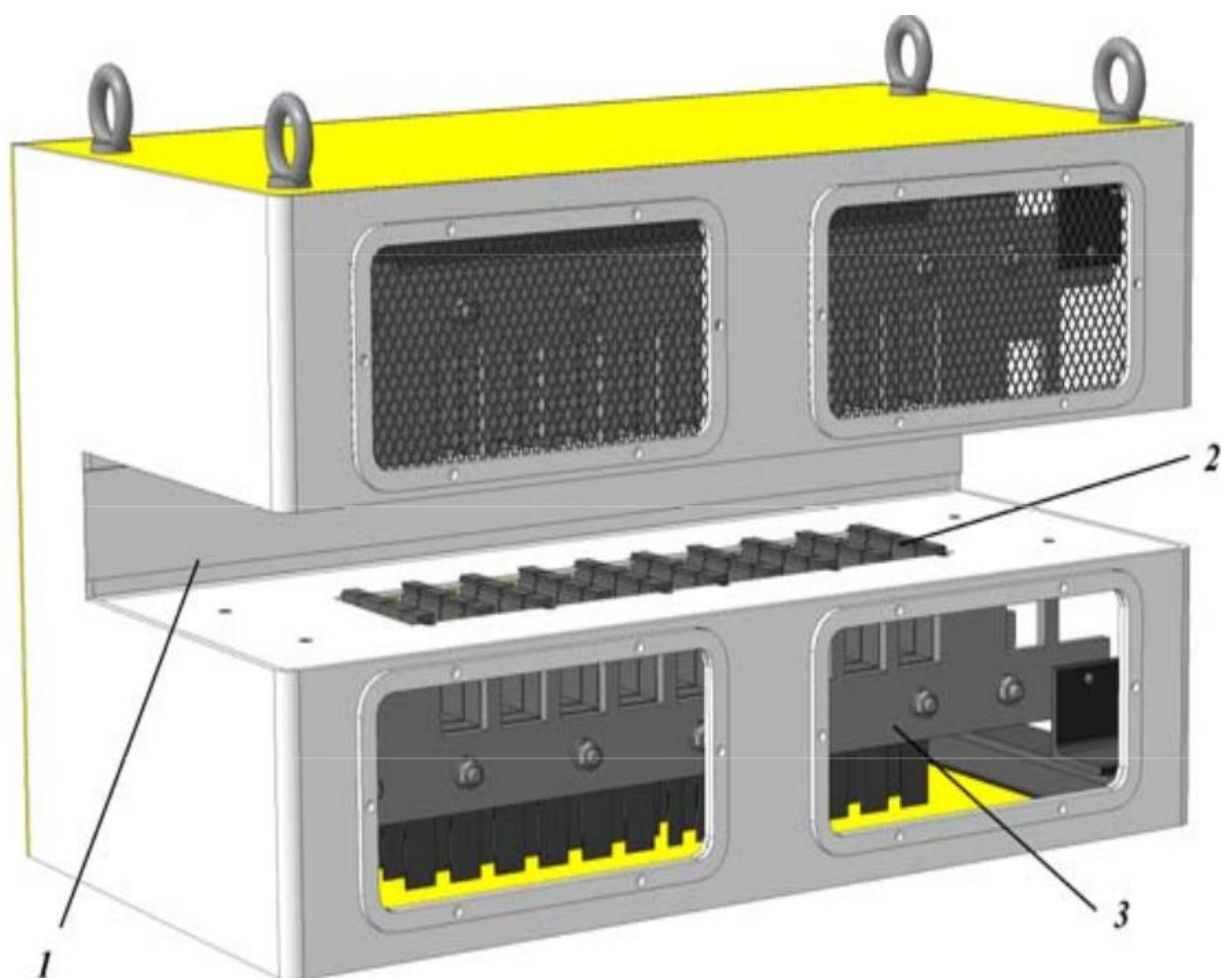


Рисунок 3.1 – Конструкция плоского линейного индукционного насоса

Является, необходимы сравнение эффективности схем обмоток, которые можно расположить в заданных габаритах насоса. Для этого в работе был проведен расчет электромагнитных характеристик с целью подбора характеристик насоса отвечающих заявленным требованиям.

Увеличение полюсного деления  $\tau$  неоднозначно влияет на тяговое усилие машины. С одной стороны увеличение полюсного деления приводит к снижению относительного зазора машины, что повышает коэффициент мощности. С другой стороны увеличение полюсного деления при фиксированной ширине машины уменьшает ее относительную ширину, усиливая влияние поперечного краевого эффекта, который в свою очередь приводит к снижению коэффициента полезного действия и тягового усилия машины.

Насос должен обеспечить достаточную надежность работать в крайне тяжелых для изоляции условиях. При длительной непрерывной работе температура активной части насоса (зубцы магнитопровода, части обмоток, расположенные в пазах магнитопровода) становится сопоставимой с температурой металла в канале (в рассматриваемом случае жидкого магния). Таким образом, основная сложность состоит в обеспечении надежной изоляции обмотки работающей при таких температурах. В существующем насосе такая изоляция выполняется на основе стекло слюдяных лент. При этом надежность такой изоляции невысока. Отмечались случаи выхода из строя насоса по причине повреждения изоляции в течении нескольких часов непрерывной работы. Предлагается обеспечить повышение надежности изоляции двумя путями: использованием новых высокотемпературных изоляционных материалов и применением предельно простой формы катушек обмотки. Последнее обстоятельство упрощает технологию наложения изоляции и снижает возможность брака при производстве. Наиболее пригодными для обеспечения вышеуказанных требований являются двухслойные концентрические обмотки, катушки которых могут быть выполнены плоскими без изгиба лобовых частей.

Поскольку рассматриваемые машины предполагается изготавливать малыми сериями, традиционный способ производства магнитопровода штамповкой неприемлем по экономическим соображениям. Для изготовления листов магнитопровода предполагается использование технологии лазерной или электроэрозионной резки. При этом стоимость работы пропорциональна длине реза. В этом отношении более выгодным является индуктор с наименьшим числом пазов.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности применения в плоских индукционных машинах с плоскими катушками схем обмоток с полузаполненными пазами, как с полным, так и с укороченным шагом обмоток.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ конструкций МГД-насосов для перекачки жидких металлов. В результате сравнения различных типов индукционных насосов для металлургических целей в большинстве случаев отдают предпочтение индукционным насосам плоского линейного типа. Меньший коэффициент полезного действия таких насосов (по сравнению с цилиндрическими насосами с внутренним магнитным сердечником) полностью окупается простотой конструкции, благоприятными условиями охлаждения индуктора и удобством монтажа и замены огнеупорной трубки.

Расчет выполнен по инженерной методике. В результате расчетов получена приемлемая мощность источника питания, а также представлены рекомендации для проектирования опытного образца МГД-насоса. Полученные результаты, соответствуют техническому заданию.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Применение МГД устройств в металлургии. Авторы: А.И. Алиферов, Ю.И. Блинов, С.А. Бояков, С.А. Галунин, Е.А. Головенко, Л.П. Горева, Е.С. Кинев, Г.Е.Кирко, И.М. Кирко, В.В. Ковальский, А.В. Комаров, Е.В. Кузнецов, К.А. Михайлов, Е.А. Павлов, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, В.Н. Тимофеев, В.Н. Федоров.
2. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс. Авторы: Э. Бааке, Д. Барглик, С. Луци, А. Никаноров, Е. Павлов, С. Павлов, М. Первухин, В. Тимовеев, С. Тимофеев, М. Хацаюк, А. Якович.
3. Индукционный МГД-насос с одноплоскостной концентрической обмоткой индуктора для транспортировки магния. Автор: Тарасов Федор Евгеньевич.
4. Цилиндрический МГД-насос для силового воздействия на расплав алюминия в процессе литья из стационарного миксера. Автор: Ковальский Виктор Васильевич.
5. Математическое моделирование работы МГД-насоса. Авторы: А.В. Воронков, М. П. Галанин, А. С. Родин.
6. Плоские односторонние линейные индукционные машины с увеличенным рабочим зазором. Автор: Неверов Владимир Юрьевич.
7. Проектирование электротехнологических установок. Авторы: А. М. Велентеенко, Т. А. Боякова, В. В. Стафиевская.
8. Линейные асинхронные двигатели/ О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов. – М. Энергоатомиздат, 1991 г