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

Политехнический институт
институт

Электротехнологии и электротехники
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия
« ____» _____20 __ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИНДУКЦИОННАЯ ЕДИНИЦА С МГД-ВРАЩАТЕЛЕМ РАСПЛАВА

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.07 Электротехнологии в металлургии

Научный руководитель _____ проф., д-р тех. наук В.Н. Тимофеев
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия
Выпускник _____ А.В. Фомин
подпись, дата инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Консультанты по разделам:

2. Математическое моделирование физических процессов в индукционной единице _____ И.С. Гудков

подпись, дата инициалы, фамилия

3. Экспериментальное исследование физических процессов в индукционной канальной печи _____ В.Д. Раков

подпись, дата инициалы, фамилия

Нормоконтролер _____ М.В. Первухин

подпись, дата инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «Индукционная единица с МГД-вращателем расплава» содержит 62 страницы текстового документа, 48 иллюстраций, 17 использованных источников.

ИНДУКЦИОННАЯ КАНАЛЬНАЯ ПЕЧЬ, ИНДУКЦИОННАЯ ЕДИНИЦА, АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ, МАГНИТНАЯ ГИДРОДИНАМИКА, ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА, УСТАНОВКА С МГД-ВРАЩАТЕЛЕМ.

Цель работы:

- разработка и создание физической модели индукционной единицы с электромагнитными вращателями.

В результате исследования были разработана аналитическая и численная модели индукционной канальной печи с МГД-вращателем в виде дополнительных катушек, на которых проведены численные эксперименты. Получены зависимости скорости вращения жидкого металла в канальной части, от режимов работы установки. Разработана и создана физическая модель индукционной единицы с электромагнитным вращателем. Проведены экспериментальные исследования на установке.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании опытно-промышленной индукционной единицы с электромагнитным вращателем.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1 Обзор публикаций и патентов по теме исследования. 8
1.1 Способы и устройства электромагнитных вращателей. 8
1.2 Принцип получения вращающего магнитного поля 15
1.3 Методы математического анализа процессов в ИЕ 18
1.4 Выводы по разделу 18
2 Математическое моделирование физических процессов в ИЕ 19
2.1 Общие сведения 19
2.2 Аналитический расчет электромагнитного поля в области «индуктор-продольный канал» 19
2.3 Численный анализ магнитогидродинамических полей в индукционной единицы с электромагнитным вращателем 30
2.4 Вывод по разделу 45
3 Экспериментальное исследование физических процессов в ИКП 46
3.1 Общие замечания 46
3.2 Описание физической модели 46
3.3 Экспериментальное исследование на физической модели 55
3.4 Выводы по разделу 59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 60
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 61

ВВЕДЕНИЕ

В России развита отрасль энергетики, металлургии, химии. Эти отрасли довольно энергоёмкие. Энергетическая система Западной и Восточной Сибири, включающая тепловые станции и гидроэлектростанции, способствует их развитию. Цветная и черная металлургия обеспечивает развитие машиностроения. У машиностроения высокие требования к металлам и их сплавам, главными проблемами качества которых, являются укрупненная кристаллическая структура, неоднородность химического состава, наличие примесей.

Одним из направлений улучшения металлургических технологий является более эффективное управление технологическим процессом на основе воздействия электромагнитного поля и токов на вещество, что позволяет изменять его агрегатное состояние, физические и химические свойства.

Основными показателями, характеризующими эффективность работы основного плавильного оборудования, являются: производительность агрегата; расход топлива или электроэнергии; качество получаемого сплава; величина безвозвратных потерь металла; возможность применения средств механизации и автоматизации трудоёмких процессов; экономичность оборудования.

Электрические индукционные канальные печи (ИКП) наиболее полно отвечают этим показателям. Однако из-за своих технических особенностей в черной металлургии ИКП не нашли широкого применения. В основном данные печи используются для приготовления сплавов цветных металлов.

Узлом, в котором происходит преобразование электрической энергии в тепловую является индукционная единица (ИЕ). По принципу действия ИЕ аналогична трансформатору, вторичной обмоткой которого является канальная часть, заполненная жидким металлом. При подключении первичной обмотки ИЕ к сети переменного напряжения, в канальной части индуцируется электрический ток, обеспечивающий выделение тепловой энергии. За счёт циркуляции металла происходит тепломассообмен между канальной частью и ванной печи.

Существует много различных модификаций ИКП. Печи типа БК-16 используются на Белокалитвинском металлургическом заводе. Печи типа ИАК – 16 для ОАО «Красноярский металлургический завод были разработаны в ОАО «ВНИИЭТО». В процессе эксплуатации данных печей был выявлен ряд недостатков, а именно: зарастание каналов окислами, трудоемкость и длительность ремонта. Накопленный опыт эксплуатации позволил специалистам ОАО «КраМЗ» г. Красноярска, ОАО «Сибэлектротерм» г. Новосибирска, ОАО «ВНИИЭТО» г. Москвы и ОАО «БКМЗ» г. Белая Калитва создать принципиально новые индукционные единицы, на базе которых разработаны крупнотоннажные ИКП типа ИАК-25/2,1; ИАК-40/3,5; ИАК-100/4,5.

В разработке и создании ИКП принимали участие учёные и специалисты: М. Я. Столов, А. В. Арефьев, В. А. Альбицкий, М. Я. Левина, А. А. Простяков - ОАО «ВНИИЭТО»; М. Я. Коротков, Б. И. Бондарев - ОАО «ВИЛС»; Н. А. Сорокин, Л. Ю. Нифонтова - ОАО «БКМЗ» г. Белая Калитва, М. Б. Оводенко, А. Н. Кузнецов, В. А. Золотухин, 3. 3. Юхнович, А. А. Темеров-ОАО «КраМЗ», В. Н. Тимофеев - Красноярский государственный технический университет (КГТУ) г. Красноярска; А. Ф.Колесниченко, Ю. М. Гориславец - Институт электродинамики (ИЭД) г. Киева и другие специалисты.

Для чистки каналов от окислов применяется механический способ путем сверления каналов, который влечет за собой простои оборудования и сокращения срока службы футеровки каналов. Для уменьшения зарастания каналов окислами целесообразно создать вращательное движение металла в канале посредством электромагнитных сил, которые обеспечиваются наложением электромагнитного поля дополнительных катушек и обмотки индуктора. Данное устройство получила название электромагнитных вращателей (ЭМВ). Вращательное движение создает множество других положительных эффектов, таких как улучшение рафинирования, создание коагуляции, а так же приводит к возникновению поступательного движения

расплава, которое улучшает тепломассообмен между ванной печи и канальной частью.

В связи с этим является **актуальным**: разработка индукционной единицы с электромагнитным вращателем, создание математических и физических моделей, экспериментальное исследование в них сложных физических процессов.

Целью диссертационной работы является разработка и создание физической модели индукционной единицы с электромагнитными вращателями.

Для достижения цели требуется решить следующие **задачи**:

1. Рассмотреть различные индукционные канальные печи с МГД вращателями.
2. Изучить методы математического и экспериментального анализа физических процессов в ИКП.
3. Построить аналитическую и численную математические модели физических процессов в ИКП.
4. Разработать и создать физическую модель для экспериментального исследования электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в индукционной единице ИКП.
5. Сравнить экспериментальные и расчетные данные, оценить достоверность теоретических данных.

1 Обзор публикаций и патентов по теме исследования.

1.1 Способы и устройства электромагнитных вращателей.

Из электротехники известно, что для получения вращающихся и бегущих магнитных полей необходимо наличие двух переменных магнитных потоков, сдвинутых относительно друг друга в пространстве и во времени.

Поэтому в таких индукционных установках, как индукционные канальная и тигельная печи, для получения вращающегося магнитного поля целесообразно использовать уже существующие магнитные потоки, возникающие вследствие протекания физических процессов в этих установках.

Такие способы и устройства предложены в авторских свидетельствах на изобретения [1,2,3,4,5,6]

В [1] предложен способ вращения жидкого металла в каналах отъемной индукционной единицы. Способ заключается в создании неоднородного переменного электромагнитного поля между ферромагнитными плоскостями.
На рисунке 1.1 Представлена схема модели, поясняющая способ вращения.

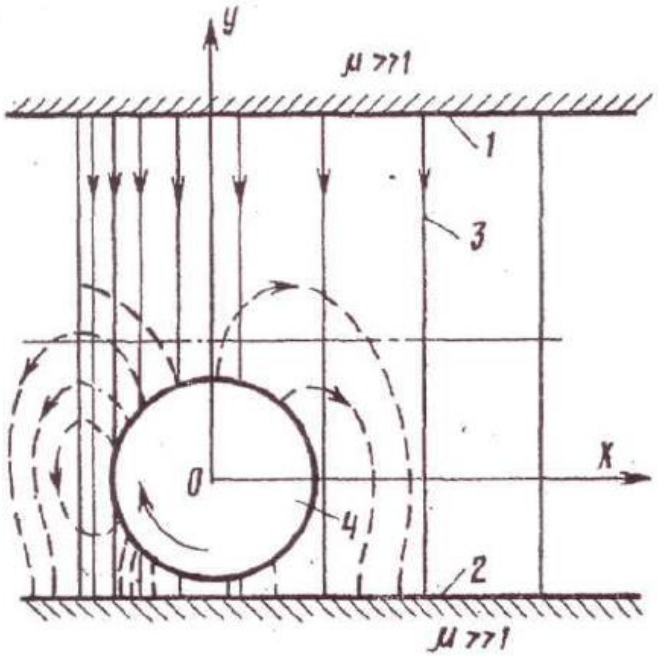


Рисунок 1.1 – Схема модели, поясняющая способ вращения электропроводного тела между ферромагнитными поверхностями

Между ферромагнитными поверхностями 1 и 2 существуют неоднородное электропроводное поле, в котором размещено электропроводное тело 4. Силовые линии электропроводного поля направлены поперек оси электропроводного тела. Под действием первичного магнитного поля в электропроводном теле наводятся вихревые токи, создающие свое магнитное поле. Если электропроводное тело сместить относительно оси симметрии, то магнитные сопротивления вторичного магнитному потоку будут различные. Вследствие различного размагничивающего действия вторичного магнитного потока и неоднородности первичного магнитного поля создается вращающий момент. Способ позволяет получить вращение электропроводного тела в неоднородном магнитном поле.

Необходимо отметить, что в окне магнитопровода ИЕ, охватывающего канал с расплавом существует мощное неоднородное переменное магнитное поле рассеяния. В [2] предложены устройства, реализующие способ вращения. Для этого достаточно сместить продольные каналы относительно плоскости, проходящей через центр катушки индуктора и перпендикулярной ее продольной оси, на величину 0,25÷0,5 диаметра продольного канала.

На рисунке 1.2,а,б,в показано три варианта смещения каналов. В первом варианте (рисунок 1.2,а) каналы смещаются по разные стороны от плоскости симметрии $N - N'$. Вращение металла при этом в обоих каналах направлено против часовой стрелки. Во втором варианте (рисунок 1.2,б) каналы смещены в одну сторону от плоскости $N - N'$. При этом в одном канале вращение металла направлено по часовой стрелке, а в другом – против.

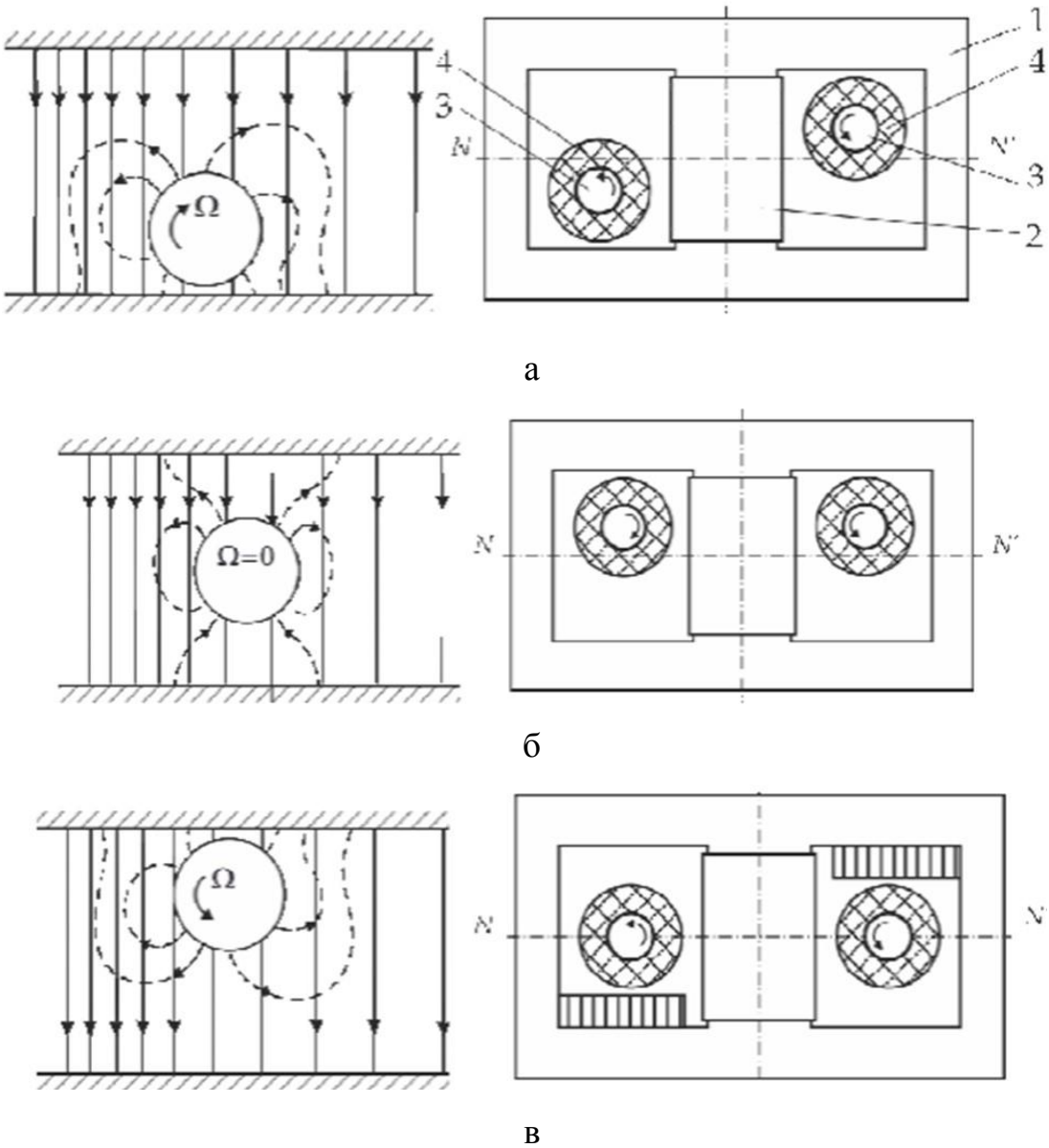


Рисунок 1.2 – Индукционная единица со смещением продольных каналов

.

На рисунке 1.2,в показан третий вариант реализации способа вращения металла в каналах. Оси продольных каналов лежат в плоскости симметрии $N - N'$, в свободные области окон магнитопровода вставляются шихтованные ферромагнитные вставки. При этом каналы оказываются расположенными также несимметрично относительно ферромагнитных поверхностей. Этот вариант имеет преимущество перед предыдущими в том, что не нужно изменять крепление шпилек магнитопровода к каркасу печи. Однако при его реализации возрастает индуктивное сопротивление обмотки индуктора.

Из анализа рассмотренных вариантов следует вывод, что реализация предложенного способа не требует дополнительных устройств и дополнительной энергии. Недостатком способа является ограниченность скорости вращения жидкого металла.

Если на пути части магнитного потока рассеяния ИЕ поставить электромагнитный экран, то в нем будут наводиться вихревые токи, создающие свой магнитный поток. В результате наложении всех потоков в области канала появится вращающееся магнитное поле, приводящее расплав во вращение. На этом принципе в [3] предложено устройство электромагнитного вращателя с экраном. В качестве фазосдвигающего устройства можно использовать короткозамкнутый виток (рисунок 1.3) В этом случае индукционная единица снабжена короткозамкнутым витком, охватывающим продольный канал, с возможностью поворота вокруг оси канала.

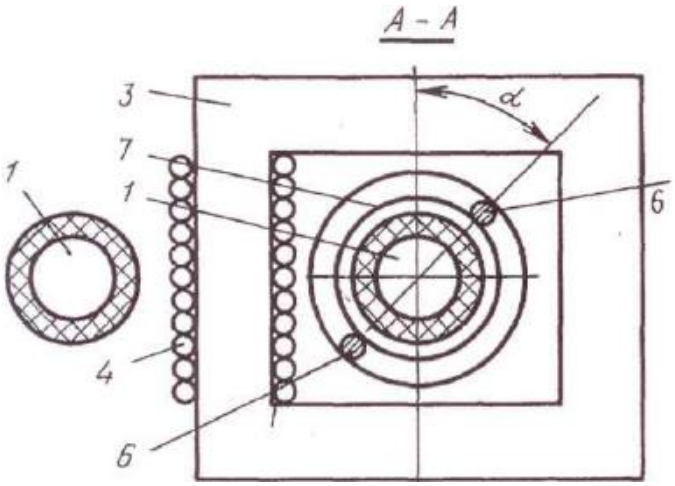


Рисунок 1.3 – Короткозамкунтый виток, охватывающий продольный канал

С целью повышения скорости вращения расплава в каналах был предложен ряд устройств с дополнительными катушками. В [4] предложена индукционная единица, которая снабжена дополнительной катушкой, которая запитывается от внешнего источника переменного напряжения с возможностью регулирования величины и фазы тока. Ток дополнительной катушки создает

свое магнитное поле, которое совместно с магнитным полем рассеяния создают вращающееся магнитное поле (рисунок 1.4)

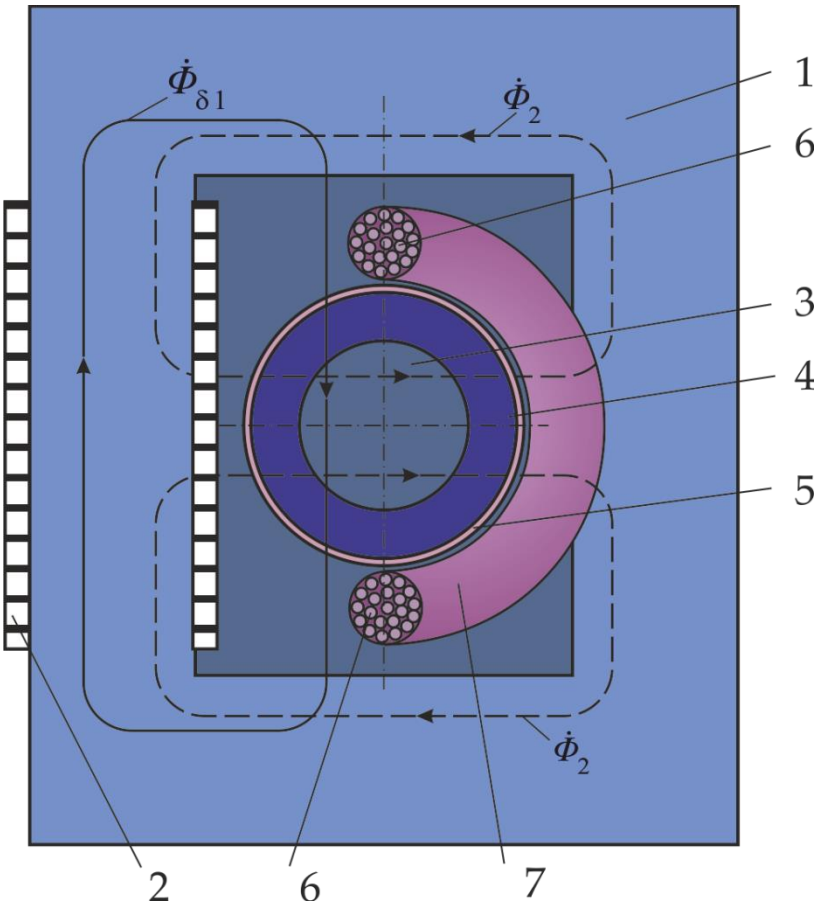


Рисунок 1.4 – Дополнительная катушка, охватывающая продольный канал: 1 – магнитопровод индуктора, 2 – основная обмотка индуктора, 3 – продольный канал с расплавом, 4 – футеровка продольного канала, 5 – металлический каркас продольного канала, 6 – продольные элементы дополнительной катушки, 7 – лобовая часть дополнительной катушки.

С целью повышения транзитного течения в канальной части и увеличения тепломассообмена с ванной в [5] предложено использовать дополнительную катушку, состоящую из двух секций, которые смещены одна относительно другой по высоте продольного канала (рисунок 1.5)

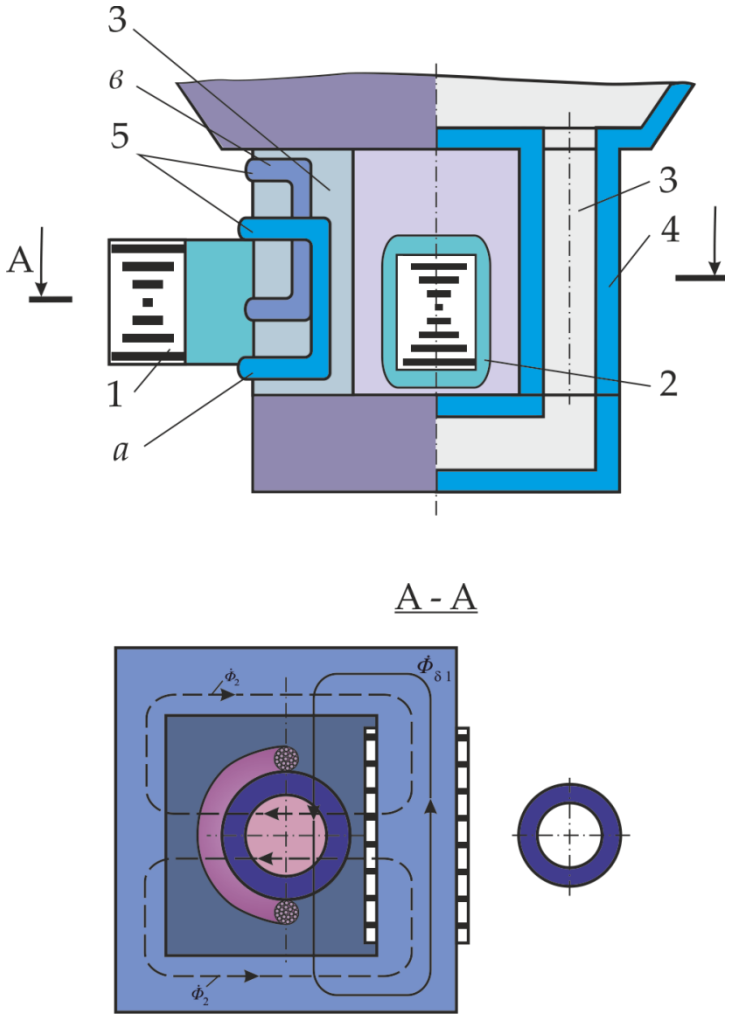


Рисунок 1.5 – Дополнительная катушка со смещенными секциями по высоте продольного канала: 1 – магнитопровод индуктора, 2 – основная обмотка индуктора, 3 – канал с расплавом, 4 – футеровка канала, 5 – две секции дополнительной катушки, смещенные относительно друг друга по вертикальной оси.

В [6] предложена индукционная единица с дополнительной обмоткой, секции которой расположены на магнитопроводе и соединены встречно. Такое устройство позволяет организовать вращательное движение в двух каналах ИЕ и регулировать скорость вращения в широких пределах.

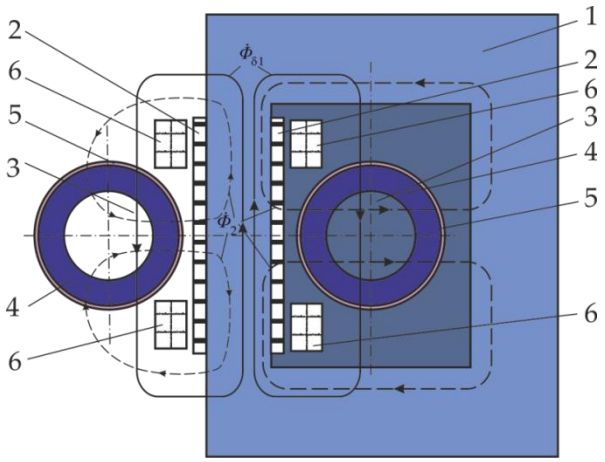


Рисунок 1.6 – Дополнительная катушка из двух секций, намотанных на основную обмотку и включенных встречно

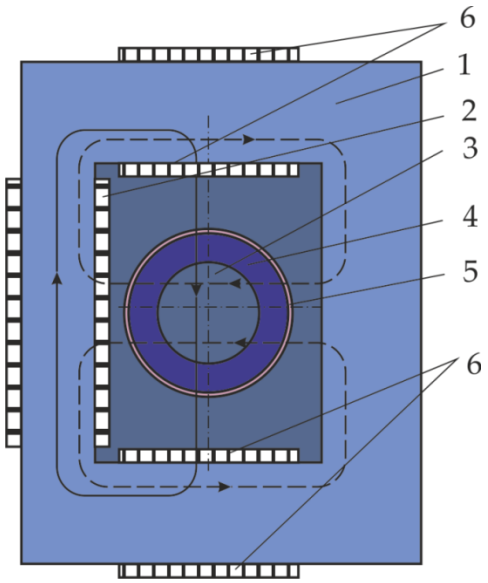


Рисунок 1.7 – Дополнительная катушка из двух секций, намотанных на ярмах магнитопровода и включенных встречно

Устройство состоит из магнитопровода 1 с основной обмоткой 2, продольных каналов 3 с футеровкой 4 корпуса для футеровки 5 и дополнительной обмотки 6, выполненной из двух секций. Секции дополнительной катушки могут располагаться как и на магнитопроводе поверх основной обмотки (рисунок 1.6), так и на ярмах магнитопровода (рисунок 1.7)

1.2 Принцип получения вращающего магнитного поля

Рассмотрим подробнее принцип получения вращающего магнитного поля на примере индукционной единицы с дополнительными катушками расположенными на магнитопроводе [11].

Индукционная канальная печь (ИКП) представляет собой электропечь, в которой преобразование электрической энергии в тепловую происходит в индукционных единицах (ИЕ). На рисунке 1.8 представлена фотография ИКП типа ИАК-40, установленной в литейном цехе Красноярского металлургического завода.

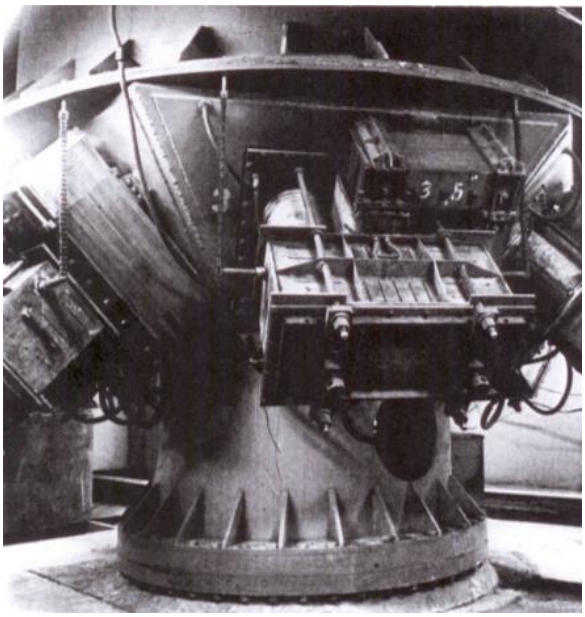


Рисунок 1.8 – Индукционная канальная печь ИАК-40

Печь состоит из футерованной огнеупорным кирпичом ванны и девяти ИЕ. Индукционные единицы выполнены отъемными, чтобы иметь возможность быстрой замены вышедшей из строя ИЕ на новую. Эскиз отъемной ИЕ представлен на рисунке 1.9. Конструктивно ИЕ состоит из магнитопровода 2 с обмоткой 3 и футерованной канальной части 4, которая посредством расплавляемого металла (расплава) связана с ванной 1. По принципу действия

ИЕ аналогична однофазному трансформатору, работающему в режиме короткого замыкания. Одновитковой вторичной обмоткой является канальная часть заполненная жидким металлом и часть соединяющегося с ним металла ванны печи.

При подключении обмотки индуктора к сети переменного напряжения в магнитопроводе 2 появляется переменный магнитный поток. Часть магнитного потока $\underline{\Phi}_0$ замыкается по магнитопроводу и полностью охватывает каналы с металлом. В результате в канале возникает переменный электрический ток $\underline{I}_2$, выделяющий тепловую энергию, мощность которой пропорциональна $R_2 I_2^2$, где R_2 - активное сопротивление вторичной обмотки. Часть магнитного потока замыкается через окно индуктора и пронизывает каналы с металлом, эта часть называется магнитным потоком рассеяния $\underline{\Phi}_\delta$.

Вихревые токи, наведенные магнитным потоком $\underline{\Phi}_\delta$, влияют на распределение плотности тока в сечении каналов (эффект близости).

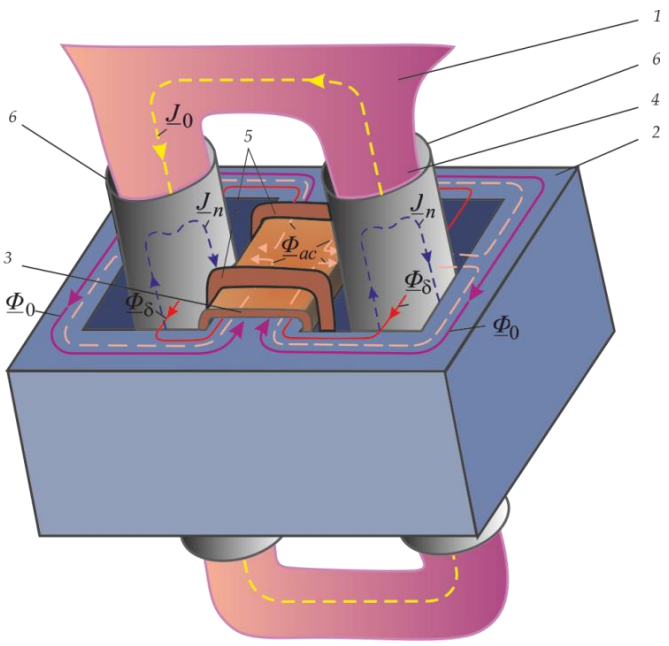


Рисунок 1.9 – Отъемная индукционная единица с электромагнитным вращателем металла в каналах

При плавке алюминия и его сплавов каналы в ИЕ быстро зарастают окислами, так как алюминий легко окисляется на поверхности ванны и в процессе плавки окисная пленка нарушается. Окислы опускаются на подину печи, попадают в каналы и оседают на стенках. Для поддержания установки в рабочем состоянии необходимо постоянно чистить каналы. Для обеспечения возможности чистки каналы выполняются цилиндрическими с прямолинейными участками. С целью снижения скорости зарастания каналов окислами целесообразно создать вращательное движение расплава в каналах посредством электромагнитного поля. Использовать для этого статор асинхронного двигателя практически не представляется возможным, поскольку для этого необходимо увеличивать размеры канальной части, снижая энергетические показатели ИЕ.

Наличие больших магнитных полей рассеяния в области каналов позволяет получить эффективное вращательное движение расплава практически не изменяя геометрию ИЕ. Для этого требуется дополнительная катушка, выполненная в виде двух секций 5, расположенных поверх обмотки индуктора и соединенных встречно. При подключении дополнительной катушки к источнику переменного напряжения, фаза которого сдвинута по отношению к фазе напряжения, приложенного к обмотке индуктора, создается магнитный поток $\underline{\Phi}_{ac}$, показанный на рисунке 1.9 пунктирной линией. Наложение двух магнитных потоков $\underline{\Phi}_{\delta}$, и $\underline{\Phi}_{ac}$, сдвинутых в пространстве и по фазе, образует в области канала с расплавом вращающееся магнитное поле, создающее вращающий электромагнитный момент. При этом часть энергии потребляемой ИЕ преобразуется в механическую энергию вращающегося металла. Принцип преобразования аналогичен работе двухфазного асинхронного двигателя.

1.3 Методы математического анализа процессов в ИЕ

Традиционно для расчета ИКП используются инженерные методики, нашедшие широкое применение на практике[7,8,9,10]

Впервые ИКП с электромагнитным вращателем подробно рассмотрены в [12]. Для анализа электромагнитных процессов используется аналитический метод в двухмерной постановке. Решение автор ищет в виде рядов Фурье, дифференциальные и интегральные характеристики ИЕ получены в виде аналитических формул. Для цилиндрического канала и прямоугольного магнитопровода решение получается в численно – аналитическом виде. То есть конечные выражения получаются в виде рядов Фурье, коэффициенты которых определяются путем решения системы алгебраических уравнений.

Использование численных методов позволяет провести анализ электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов. Для численного моделирования удобно использовать лицензионные программные продукты типа «Ansys»: «Maxwell», «Fluent» и другие.

1.4 Выводы по разделу

1. В настоящее время предложены различные устройства электромагнитных вращателей расплава в канальной части ИЕ с дополнительными катушками и без них.
2. Установка вращателей на существующие ИЕ не требует существенной переделки их конструкции.
3. Для разработки и создания физической модели ИЕ предпочтения имеют электромагнитные вращатели в виде дополнительных катушек, расположенных на магнитопроводе.
4. Для анализа физических процессов в ИЕ используются как аналитические, так и численные методы, каждый имеет достоинства и недостатки.

2 Математическое моделирование физических процессов в ИЕ

2.1 Общие сведения

С целью выявления особенностей протекания физических процессов в ИЕ, характера распределения плотности тока и удельных электромагнитных сил в канальной части, а так же построения зависимостей вращающегося электромагнитного момента от режимов работы, в начале решим двухмерную задачу о распределении электромагнитного поля аналитическим методом. Определим дифференциальные и интегральные электромагнитные характеристики. Затем построим сеточную модель системы индуктор – канал и численным методом, с использованием программного продукта Ansys проведем сравнение эффективности электромагнитных вращателей различных типов. Результаты математического моделирования используем при разработке и создании физической модели индукционной единицы с электромагнитным вращателем расплава.

2.2 Аналитический расчет электромагнитного поля в области «индуктор-продольный канал»

На рисунке 2.1 показан разрез ИЕ по сечению перпендикулярному осям продольных каналов. Разрез включает магнитопровод 1 с обмоткой 2, охваченный 3 и неохваченный 4 магнитопроводом продольные каналы и их каркасы 5. Приняв размеры в направлении осей каналов бесконечно большими, задача сводится к расчету двухмерного плоскопараллельного электромагнитного поля. Причем эту задачу можно разбить на две. Так, если принять величину магнитной проницаемости магнитопровода бесконечно большой то расчет электромагнитного поля в областях «индуктор–охваченный канал» и «индуктор–неохваченный канал» можно вести раздельно.

Рассмотрим электромагнитное поле в области цилиндрического канала с жидким металлом. Примем допущение, что металл вращается как абсолютно твердое тело. То есть угловая скорость вращения всех точек металла одинакова

и равна Ω. В качестве электромагнитного вращателя рассмотрим седлообразную дополнительную катушку, прижатую к продольному каналу.

На рисунке 2.2 представлена расчетная модель области индуктор–канал. В модели каркас продольного канала представлен в виде бесконечно тонкой цилиндрической поверхности с проводимостью, равной $\delta_c \Delta_c$, где δ_c и Δ_c – удельная электропроводность и толщина каркаса. Такое допущение оправдано тем, что глубина проникновения электромагнитного поля значительно превосходит толщину каркаса (нержавеющая сталь, толщиной $\Delta_c = 4$ мм : $\delta_c = 1{,}14 \cdot 10^6$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$).

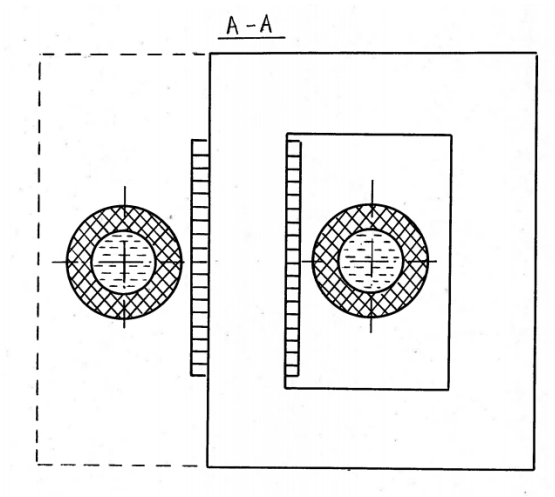


Рисунок 2.1 – Двухмерная расчетная модель «индуктор – продольные каналы»

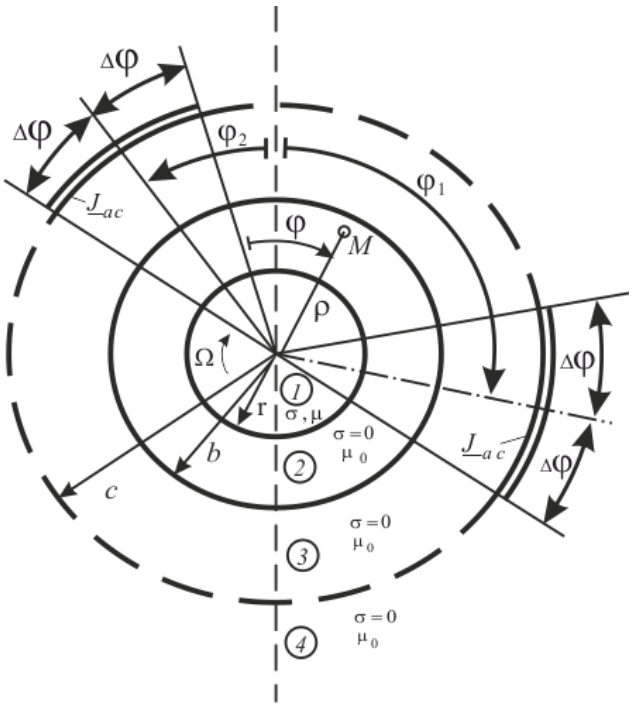


Рисунок 2.2 – Расчетная модель области «индуктор - продольный канал»

Дополнительная катушка с током представлена бесконечно тонкими токовыми слоями с линейной плотностью

$$\underline{J}_{ac} = \frac{W_{ac}\underline{I}_{ac}}{2\Delta\varphi c}, \qquad (2.1)$$

где W_{ac} и $\underline{I}_{ac}$ – число витков и комплексный ток дополнительной катушки; c – радиус дуги токового слоя.

В цилиндрической системе координат комплексные напряженности электрического и магнитного полей имеют составляющие:

$$\underline{\boldsymbol{E}} = \boldsymbol{e}_z E_z, \tag{2.2}$$

$$\underline{\boldsymbol{H}} = \boldsymbol{e}_\rho \underline{H}_\rho + \boldsymbol{e}_\varphi \underline{H}_\varphi. \tag{2.3}$$

В области 1 $(\rho < r)$ справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_{z1}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \underline{E}_{z1}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 \underline{E}_{z1}}{\partial \varphi^2} + \mu_0 \gamma \Omega \frac{\partial \underline{E}_{z1}}{\partial \varphi} - j\omega\mu_0\gamma \underline{E}_{z1} = 0, \tag{2.4}$$

где Ω – вектор линейной скорости металла в точке определения поля; γ – удельная электропроводность металла в канале; ω – угловая частота тока.

В областях 2,3,4 $\underline{E}_{zk}$ (k=2,3,4) удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_{zk}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \underline{E}_{z1}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 \underline{E}_{z1}}{\partial \varphi^2} = 0, \quad k = 2,3,4. \tag{2.5}$$

Представим решение уравнений (2.4) и (2.5) в виде ряда Фурье индекс («z» в обозначении составляющей $\underline{E}_z$ в дальнейшем опускаем)

$$\underline{E}(\rho,\varphi) = \sum_{n=+\infty}^{n=-\infty} \underline{E}_n(\rho) e^{jn\varphi}, \tag{2.6}$$

где

$$\underline{E}_n(\rho) = \frac{1}{2\pi}\int_{\varphi_0}^{\varphi_0+2\pi} \underline{E}(\rho,\varphi) e^{-jn\varphi} \partial\varphi.$$

Умножив (2.4) и (6.5) на функцию $e^{-jn\varphi}$ и проинтегрировав получившееся выражение по φ от φ_0 до $\varphi_0 + 2\pi$, получим

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\rho\frac{\partial \underline{E}_{n1}}{\partial\rho}\right)+\left(\beta_n^2-\frac{n^2}{\rho^2}\right)\underline{E}_{n1}=0; \tag{2.7}$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}\left(\rho\frac{\partial \underline{E}_{nk}}{\partial\rho}\right)-\frac{n^2}{\rho^2}\underline{E}_{nk}=0, \quad k=2,3,4, \tag{2.8}$$

где $\beta_n^2 = j(n\mu_0\gamma\Omega - \mu_0\gamma\omega)$

Общие интегралы уравнений (2.7) и (2.8) имеют вид

При $n = 0$

$$\underline{E}_{01}=C_{01}J_0(\beta_0\rho)+D_{01}N_0(\beta_0\rho); \tag{2.9}$$

$$\underline{E}_{0k}=C_{0k}+D_{0k}\,ln\frac{\rho}{r},\ k=2,3,4, \tag{2.10}$$

при $n \neq 0$

$$\underline{E}_{n1}=C_{n1}F_n(\beta_n\rho)+D_{n1}\Phi_n(\beta_n\rho), \tag{2.11}$$

где

$$F_n(\beta_n\rho)=\begin{cases} J_n(\beta_n\rho), & n\mu_0\gamma\Omega-\mu_0\gamma\omega>0,\\ I_n(\beta_n\rho), & n\mu_0\gamma\Omega-\mu_0\gamma\omega<0,\\ 1, & n\mu_0\gamma\Omega-\mu_0\gamma\omega=0,\end{cases}$$

$$\Phi_n(\beta_n\rho)=\begin{cases} Y_n(\beta_n\rho), & n\mu_0\gamma\Omega-\mu_0\gamma\omega>0,\\ K_n(\beta_n\rho), & n\mu_0\gamma\Omega-\mu_0\gamma\omega<0,\\ \infty, & n\mu_0\gamma\Omega-\mu_0\gamma\omega=0.\end{cases}$$

Здесь $J_n(\beta_n\rho)$ и $Y_n(\beta_n\rho)$ – функции Бесселя аргумента $\beta_n\rho$ и n-го порядка ($n=1.2,.....)$; $I_n(\beta_n\rho)$ и $K_n(\beta_n\rho)$ – модифицированные функции Бесселя аргумента $\beta_n\rho$ и n-го порядка. Так как при $\rho\to 0$, $Y_n(\beta_n\rho)\to\infty$ и $K_n(\beta_n\rho)\to\infty$, необходимо положить $D_{n1}=0$.

При k=2,3,4, имеем

$$E_{nk}=C_{nk}\rho^{n}+D_{nk}\rho^{-n}. \tag{2.12}$$

Постоянные интегрирования C_{nk} и D_{nk} определяются исходя из граничных условий. В соответствии с рисунком 2.2 запишем:

на поверхностях:

$$\left.\begin{matrix}\underline{E}_1=\underline{E}_2 \\ \underline{H}_{\varphi 1}=\underline{H}_{\varphi 2}\end{matrix}\right|_{\rho=r} \qquad \left.\begin{matrix}\underline{E}_2=\underline{E}_3 \\ \underline{H}_{\varphi 3}-\underline{H}_{\varphi 2}=\Delta_c\delta_c E_2\end{matrix}\right|_{\rho=R}, \tag{2.13}$$

$$\underline{E}_3=\underline{E}_4\big|_{\rho=c}, \qquad \underline{H}_{\varphi 4}-\underline{H}_{\varphi 3}=\left.\begin{cases}\underline{J}_{\partial k}, & \varphi_1-\Delta\varphi<\varphi<\varphi_1+\Delta\varphi, \\ 0 & \\ -\underline{J}_{\partial k}, & -\varphi_2-\Delta\varphi<\varphi<-\varphi_2+\Delta\varphi\end{cases}\right|_{\rho=c} \tag{2.14}$$

Составляющие напряженности магнитного поля $\underline{H}_\varphi$ и $\underline{H}_\rho$ можно определить из уравнений Максвелла.

Из уравнений Максвелла следует

$$\underline{H}_\varphi=\frac{1}{j\omega\mu_0}\frac{\partial\underline{E}_z}{\partial\rho}, \tag{2.15}$$

$$\underline{H}_{\rho} = -\frac{1}{j\omega\mu_0}\frac{\partial E_z}{\partial\varphi}. \qquad (2.16)$$

Подставив выражения $\underline{E}_i$ и $\underline{H}_{\varphi i}$ $(i = 1,2,3,4)$ в виде рядов Фурье в граничные условия (2.13-2.18), получим

$$C_{n4} = \frac{1}{2}\left(C_{n1}Q_{n1}r^{-n} + j\omega\mu_0\frac{\Psi_n}{n}c^{-n+1}\right) \quad D_{n4} = \frac{1}{2}\left(C_{n1}Q_{n2}r^{n} - j\omega\mu_0\frac{\Psi_n}{n}c^{n+1}\right), \qquad (2.17)$$

$$Q_{n1} = T_{1n}\left(1+\frac{\varepsilon}{2n}\right) + T_{2n}\frac{\varepsilon}{2n}\left(\frac{R}{r}\right)^{-2n} \quad Q_{n2} = T_{2n}\left(1-\frac{\varepsilon}{2n}\right) - T_{1n}\frac{\varepsilon}{2n}\left(\frac{R}{r}\right)^{2n},$$

$$T_{1n} = F_n(\beta_n r) + \frac{\beta_n r}{n}F_n^{'}(\beta_n r) \quad \Psi_n = \frac{j_{\partial k}}{n\pi}\sin(n\Delta\varphi)\left(e^{-jn\varphi_1} - e^{jn\varphi_2}\right) \quad \varepsilon = j\omega\mu_0\gamma_э\Delta_э R, \qquad (2.18)$$

$$T_{2n} = F_n(\beta_n r) - \frac{\beta_n r}{n}F_n^{'}(\beta_n r).$$

Полученные соотношения справедливы для индукционной единицы с цилиндрическим каналом и различной формой магнитопровода. Форма магнитопровода и расположение на нем обмотки индуктора, дополнительных катушек в виде двух секций, намотанных на ярма или основную обмотку, определяют постоянные интегрирования C_{n1}.

Рассмотрим электромагнитное поле ИЕ, имеющей круглый магнитопровод. В этом случае внутренняя поверхность магнитопровода является координатной в цилиндрической системе координат и постоянные интегрирования C_{n1} определяются аналитически.

На рисунке 2.3 представлена расчетная модель такой ИЕ. Магнитопровод индуктора заменен средой с магнитной проницаемостью $\mu = \infty$ и электропроводностью $\delta = 0$.

Обмотку индуктора обычно изготавливают однослойной из медной или алюминиевой водоохлаждаемой трубки.

В расчетной модели обмотка представлена бесконечно тонким токовым слоем с линейной плотностью тока

$$\underline{J}_i = \frac{W_i \underline{I}_i}{2b\theta}, \tag{2.19}$$

где W_i и $\underline{I}_i$ - число витков и комплексный ток обмотки индуктора.

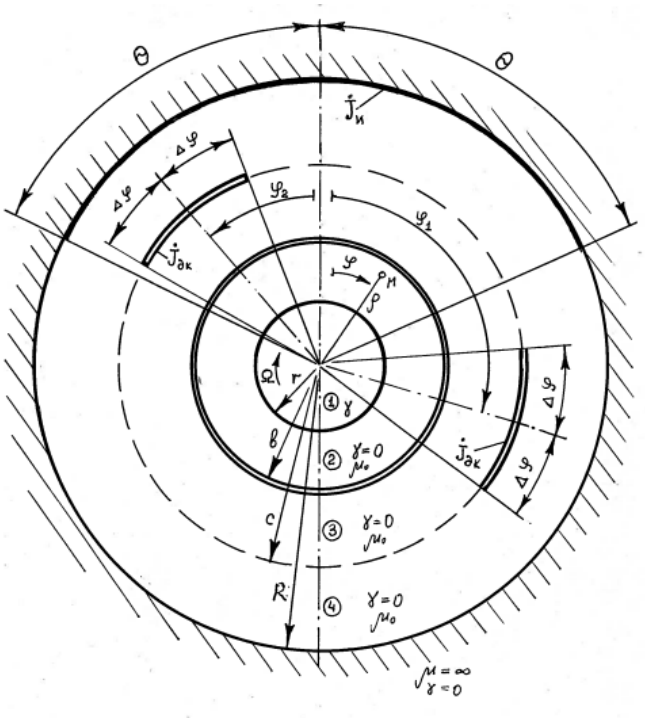


Рисунок 2.3 – Индукционная единица с круглым магнитопроводом

Краевое условие на поверхности магнитопровода $(\rho = b)$ имеет вид

$$\underline{H}_{\varphi 4}\Big|_{\rho=b} = \begin{cases} -\underline{J}_i, & -\theta < \varphi + \theta, \\ 0, & \theta < \varphi < 2\pi - \theta. \end{cases} \tag{2.20}$$

Подставив функцию $\underline{H}_{\varphi 4}$ в (2.20), получим

$$C_{n1} = \frac{j2\omega\mu_0\eta_n b - j\omega\mu_0\psi_n c\left((b/c)^n + (b/c)^{-n}\right)}{n\left(Q_{1n}(b/r)^n - Q_{2n}(b/r)^{-n}\right)}. \tag{2.21}$$

Распределение плотности тока. Для удобства анализа распределения плотности тока и электромагнитных сил совместим координатную сетку с сечением канала, как показано на рисунке 2.5.

Выражения для плотности тока представлены в виде рядов Фурье, что позволяет выразить его в виде двух составляющих: J_0 - плотность тока, обусловленного основным магнитным потоком Φ_0 (постоянная составляющая ряда); J_n - плотность вихревых токов, наведенных в канале магнитным потоком рассеяния основной обмотки индуктора и магнитными потоками электромагнитного вращателя (гармонические составляющие ряда).

На рисунке 2.6 представлены графики распределения относительной плотности тока J и ее составляющих J и J_n на поверхности канала ($\rho = 1$). Расчеты проводились при следующих данных: радиус канала $r = 80$ мм; удельная электропроводность жидкого алюминия $\delta_{Al} \approx 3{,}57 \cdot 10^6$ 1/Ом·м; частота тока $f = 50$ Гц; магнитопровод прямоугольный с относительными размерами: $h_1 = h_2 = 380$ мм; $b_1 = 215$ мм; $b_2 = 185$ мм; электромагнитный вращатель отсутствует и скорость вращения металла $\Omega = 0$. Данные размеры соответствуют конструкции ИЕ промышленной печи ИАК - 40/3.5.

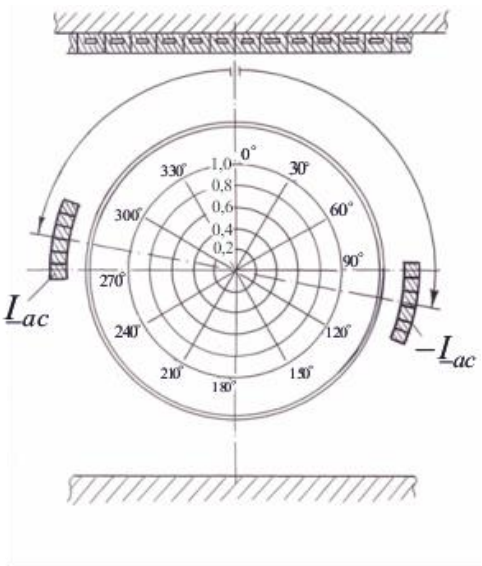


Рисунок 2.5 – Расчетная сетка системы канал–индуктор

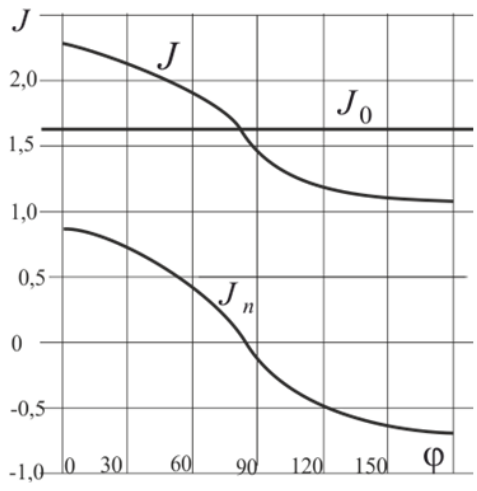


Рисунок 2.6 – Распределение плотности тока на поверхности канала

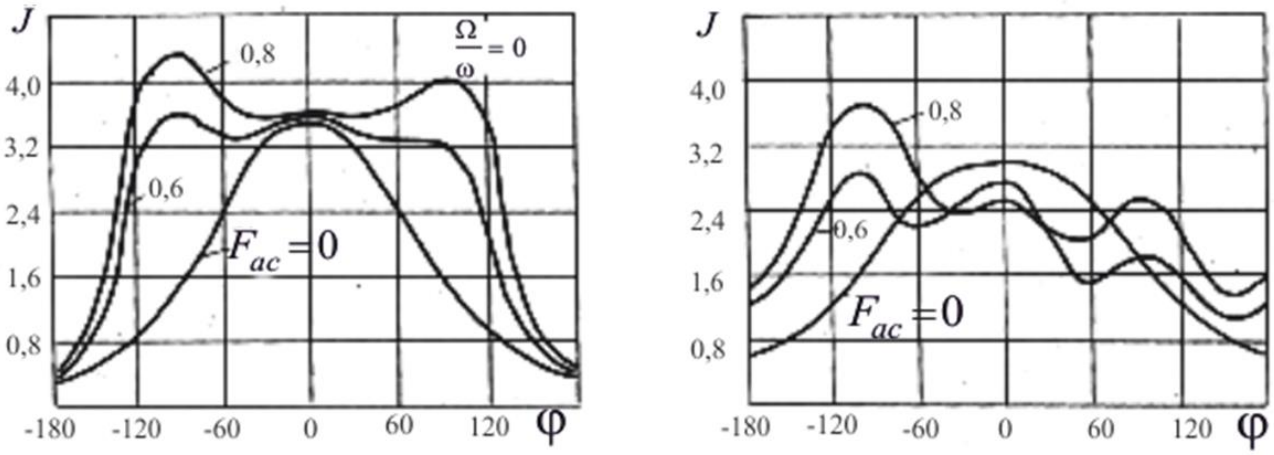
Как видно из графиков, составляющая J_0 имеет постоянное на поверхности канала значение и соответствует плотности переменного тока, протекающего по уединенному цилиндрическому проводнику. Составляющая J_n имеет максимальные значения вблизи обмотки индуктора ($\varphi = 0$) и на противоположной стороне ($\varphi = 180^\circ$), что соответствует характеру вихревых токов. Результирующая плотность тока J является векторной суммой составляющих J_0 и J_n и отражает характер распределения магнитного поля в окне магнитопровода.

Наличие в системе индуктор-канал электромагнитного вращателя изменяет характер распределения плотности тока и электромагнитных сил в канале.

На рисунке 2.7 а изображены графики распределения плотности тока на поверхности канала при различных значениях относительной намагничивающей силы дополнительной катушки $F_{ac} = w_{ac} I_{ac} / w_i I_i$. При этом полагалось отсутствие вращательного движения металла $\Omega = 0$. С увеличением величины F_{ac} увеличивается плотность тока на поверхности канала вблизи проводников дополнительной катушки (проявление эффекта близости). С появлением вращательного движения металла, например, с относительной угловой скоростью $\Omega/\omega = 0{,}6$ (рисунок 2.7 б), характер распределения плотности

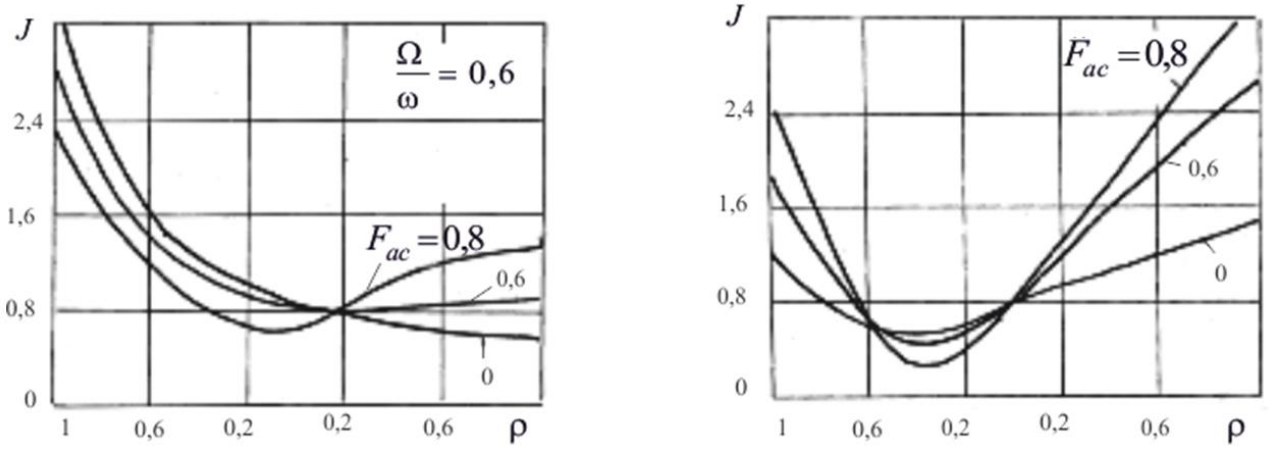
тока на поверхности канала становится более равномерным. На рисунках 2.8 а и 2.8 б изображены графики распределения плотности тока в сечениях $0^\circ - 180^\circ$ и $90^\circ - 270^\circ$ соответственно, при различных значениях $\hat{F}_{ac}$ и $\Omega/\omega = 0{,}6$.

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что вращательное движение металла делает распределение плотности тока на поверхности канала более равномерным. Это уменьшает градиент температуры в футеровке и повышает надежность канальной части ИЕ.



а б

Рисунок 2.7 – Распределение плотности тока на поверхности канала:
а – при $\Omega/\omega = 0$; б – при $\Omega/\omega = 0{,}6$



а б

Рисунок 2.8 – Распределение плотности тока:

а – в сечении $0^\circ - 180^\circ$; б – в сечении $90^\circ - 270^\circ$

Электромагнитный момент. ИЕ с электромагнитными вращателями можно рассматривать как несимметричную двухфазную асинхронную машину. Намагничивающие силы обмоток такой машины создают несимметричное, в общем случае, эллиптическое магнитное поле, которое на основе метода симметричных составляющих можно рассматривать как результат наложения симметричных круговых полей прямого и обратного, вращающихся в противоположные стороны.

Частным случаем несимметричной двухфазной системы представляет собой чисто однофазная система токов, когда ток в одной из обмоток отсутствует, например, $I_{ac} = 0$. В этом случае пульсирующее магнитное поле (магнитное поле рассеяния) можно рассматривать как результат наложения двух одинаковых круговых поля, вращающихся в противоположных направлениях.

На рисунке 2.9 представлены зависимости относительного электромагнитного момента гармоник ± 1 от относительной скорости вращения Ω/ω при различных значениях намагничивающей силы F_{ac}. Дополнительная катушка находится в плоскости $90^\circ - 270^\circ$ и питается током, сдвинутым по фазе относительно тока индуктора на 90°. При отсутствии тока в дополнительной катушке ($F_{ac} = 0$) и скорости вращения ($\Omega/\omega = 0$) моменты M_{+1} и M_{-1} плюс первой и минус первой гармоник равны по величине и противоположны по направлению. Результирующий пусковой момент в этом случае равен нулю и в канале отсутствует однонаправленное вращательное движение металла. Если металлу предварительно сообщить вращение с помощью какого-то пускового устройства ($\Omega/\omega > 0$), то M_{+1} становится больше M_{-1} и вращательное движение может сохраниться и после отключения пускового устройства. При наличии тока в дополнительной катушке ($F_{ac} \succ 0$) в пусковой период $M_{+1} > M_{-1}$ и появляется электромагнитный момент, приводящий металл во вращательное движение.

Как следует из представленных графиков, с увеличением F_{ac} величина M_{+1} растет, а величина M_{-1} уменьшается. При $F_{ac} \geq 0,3$ результирующий момент практически равен моменту M_{+1} и влиянием гармоники -1 можно пренебречь.

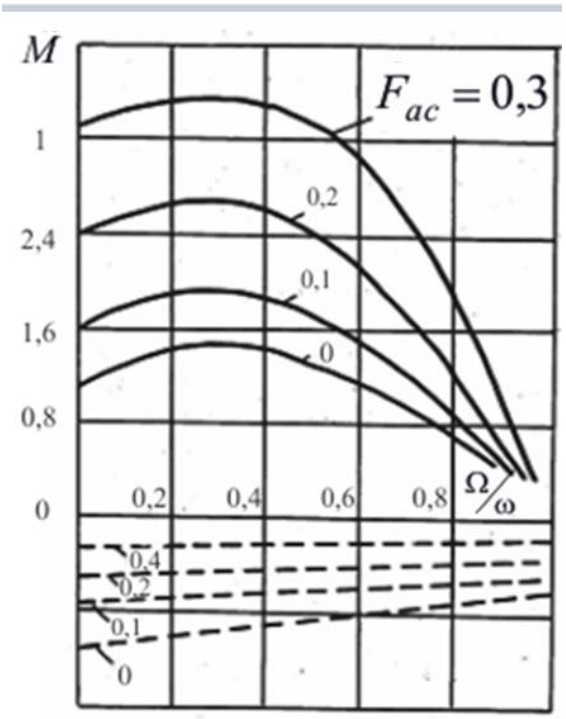
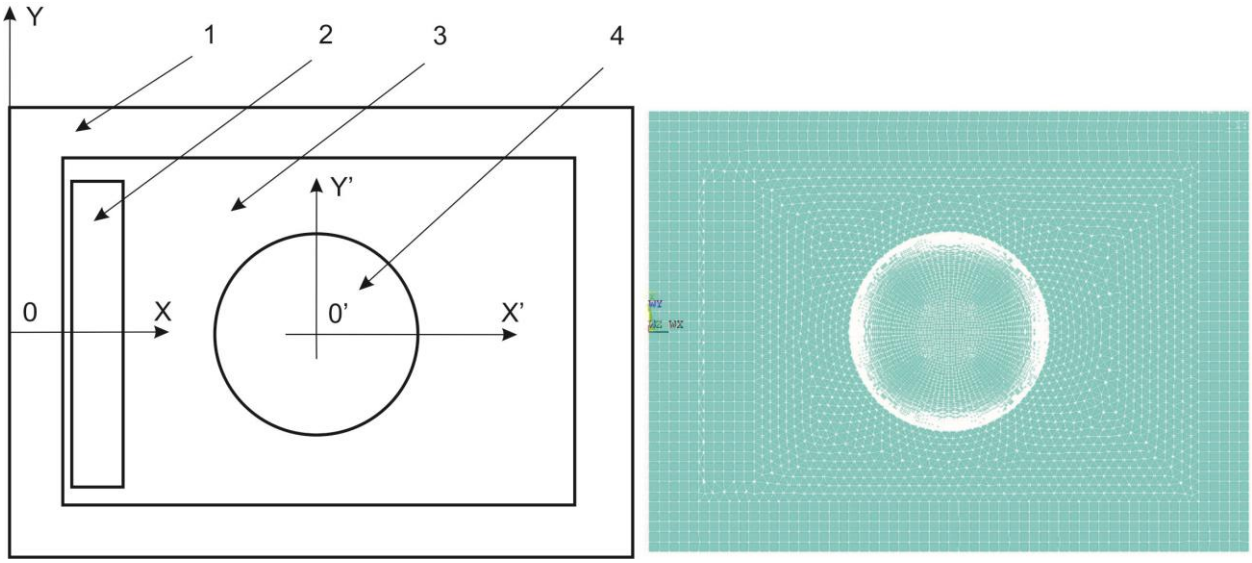


Рисунок 2.9 – Зависимости электромагнитного момента гармоник от скорости вращения металла

2.3 Численный анализ магнитогидродинамических полей в индукционной единицы с электромагнитным вращателем

В пакете конечно-элементного моделирования ANSYS была построена расчетная осесимметричная двухмерная модель индукционной единицы, показанная на рисунке 2.3. Модель симметрична относительно главной оси Y, в модели находятся магнитопровод 1, индуктор 2, воздух 3, канал 4, заполненный расплавом. Диаметр канала составляет 0,35 м. Магнитодвижущая сила главной катушки составляет 15 кА, частота тока 50 Гц. На рисунке 2.1,б представлена сетка конечных элементов модели.



а б

Рисунок 2.3 – Расчетная осесимметричная двухмерная модель

Для анализа электромагнитного и гидродинамического полей в программной среде решались система уравнений Максвелла и система уравнений Навье-Стокса. Электромагнитное поле рассчитывалось через вектор-потенциал магнитного поля в комплексной форме. При расчете гидродинамических характеристик удельные электромагнитные силы, полученные в электромагнитном расчете Ansys Mechanical, интерполируются из системы координат X Y (рисунок 2.3,а), в сетку гидродинамической задачи Ansys CFX, где производится гидродинамический расчет течения металла в канале.

В результате поиска была выбрана k-**ω** модель турбулентности, в качестве моделируемого металла заполняющего канал печи был выбран жидкий алюминий имеющий электропроводность γ=3,36·106 $(\Omega \cdot \mathrm{m})^{-1}$, плотность ρ=2370 кг/м^3, динамическую вязкость μ=0,001 Па·с. Далее рассмотрим основные способы и устройства создания одноконтурного вращения в канале ИЕ.

Под действием магнитного поля в каждом элементарном элементе жидкого металла создается электромагнитная сила, средняя объемная, за период, плотность которой определяется из выражения; Н/м^3

$$f_{эм} = Re\frac{1}{2}\left(\dot{\delta} \times \dot{B}\right), \tag{2.22}$$

где $\dot{\boldsymbol{\delta}}$–комплексный вектор плотности электрического тока, А/м^2;

$\dot{\boldsymbol{B}}$–комплексный вектор плотности магнитной индукции, Тл.

Раскладывая на составляющие вектор электромагнитной силы в цилиндрических координатах (рисунок 2.4), получаем:

$$f_{эм} = e_\theta f_\theta + e_r f_r\ , \tag{2.23}$$

где $\boldsymbol{e_\theta}$,$\boldsymbol{e_r}$– единичные вектора цилиндрической системы координат.

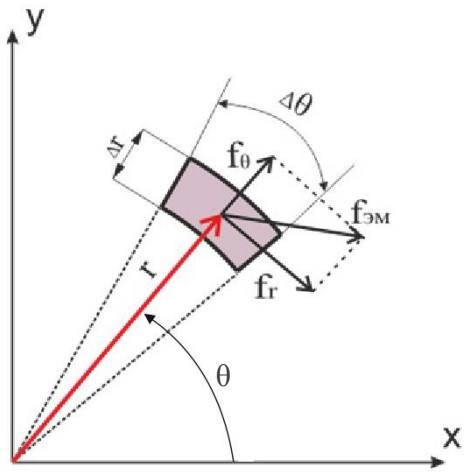


Рисунок 2.4 – Силы в элементарном конечном элементе канала

Электромагнитный момент, действующий на объемный элемент жидкого металла, определяется из выражения; Н·м

$$dM = f_\theta \cdot r \cdot d\theta dr dz, \tag{2.24}$$

где r – расстояние до элемента от центра канала, м.

Интегральный момент действующий на весь объем канала; Н·м

$$M = l\int_0^{2\pi}\int_0^R dMdV = l\int_0^{2\pi}\int_0^R \mathrm{f}_\theta \cdot r^2 dr d\theta, \qquad (2.25)$$

где l–длина канала по оси Z.

2.4 Результаты численного эксперимента с разными устройствами вращения

Седлообразная катушка. Максимальный вращающий момент в металле канала получается при условии наложения на канал двух переменных магнитных потоков сдвинутых в пространстве и по фазе на 90 градусов. Для выполнения этого условия необходимо дополнительную катушку расположить в плоскости OY и питать ее электрическим током, сдвинутым по фазе относительно тока обмотки индуктора на 90 градусов. Расположение дополнительной катушки показано на рисунке 2.5. Зависимость момента в канале от величины тока в дополнительной катушке представлена на рисунке 2.6.

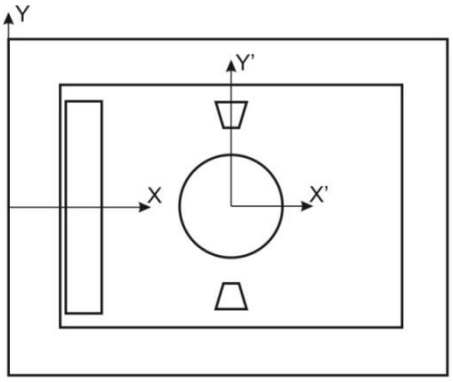


Рисунок 2.5 – Расположение седлообразной катушки относительно канала

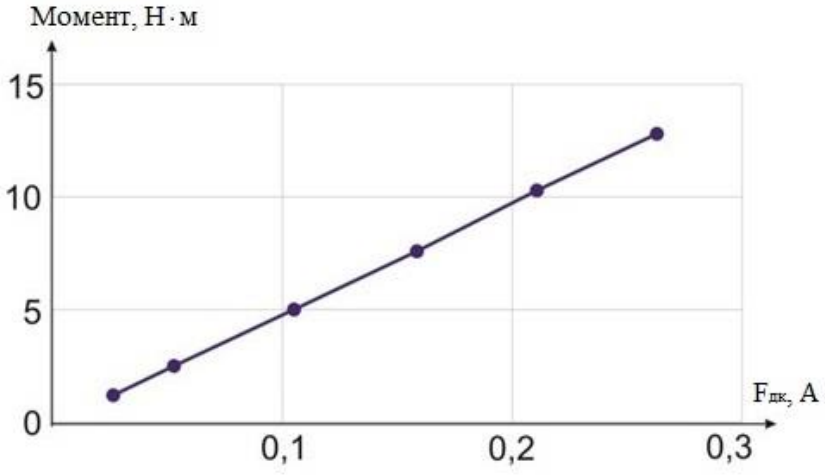


Рисунок 2.6 – Зависимость момента в канале от величины тока в дополнительной катушке

В дальнейшем за базисный момент принят максимальный момент в устройстве с седлообразной катушкой, а относительные моменты в других устройствах будут определены в относительном виде:

$$M^* = \frac{M}{M_б}, \qquad (2.26)$$

где M – момент в канале для рассматриваемого устройства, Н·м;

$M_б$ – базисный момент, Н·м.

Смещение канала. Первым из исследованных способов создания одноконтурного течения металла в канале, было смещение относительно оси симметрии.

При смещении оси канала относительно плоскости симметрии l - l' на величину Δh (рисунок 2.7), появляется вращающий момент жидкого металла в канале, при этом дополнительных устройств не требуется. Зависимость относительного электромагнитного вращающего момента от величины Δh, представлена на рисунке 2.8. При смещении канала выше оси симметрии

(Δh>0) направление вращения металла происходит в одном направлении, а при смещении канала ниже оси симметрии, направление вращения металла в канале меняется на противоположное

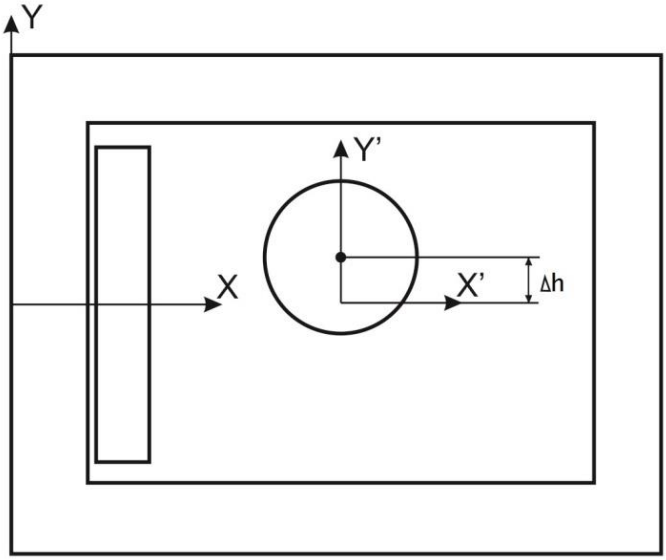


Рисунок 2.7 – Схема смещения канала по оси Y'

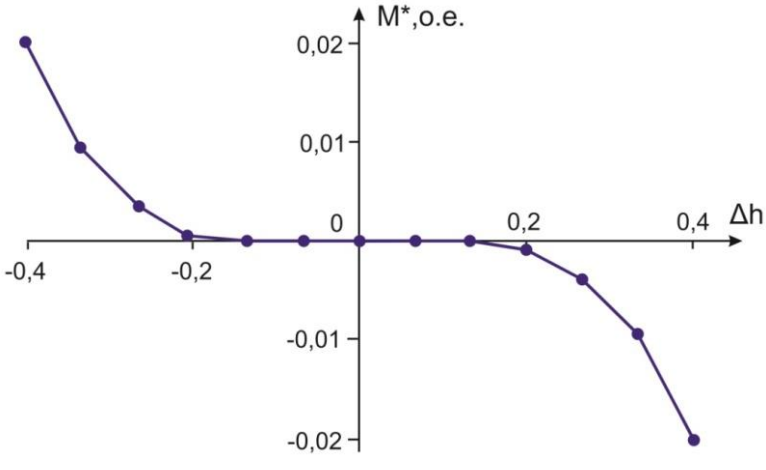
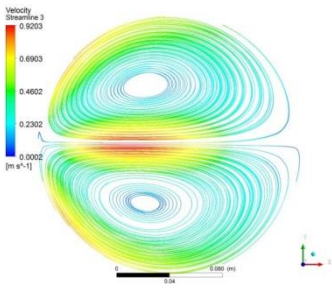
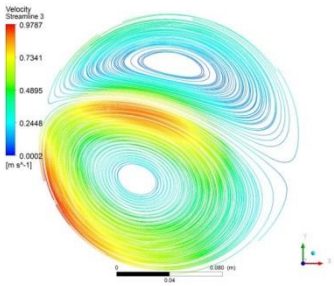
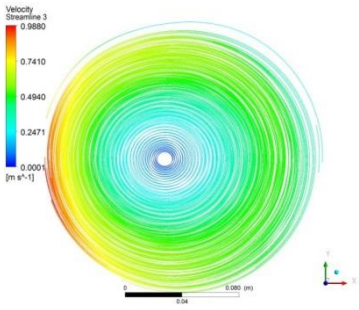


Рисунок 2.8 – Зависимость относительного момента от смещения канала

Поле скоростей в канале и средние скорости представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние смещения канала по оси Y.

Смещение по оси Y’, м	0	0,2	0,4
Средняя скорость, м/с	0,419	0,424	0,467
Поле скоростей течения металла в канале			

Значение модуля скорости течения по оси X представлено на рисунке 2.9.

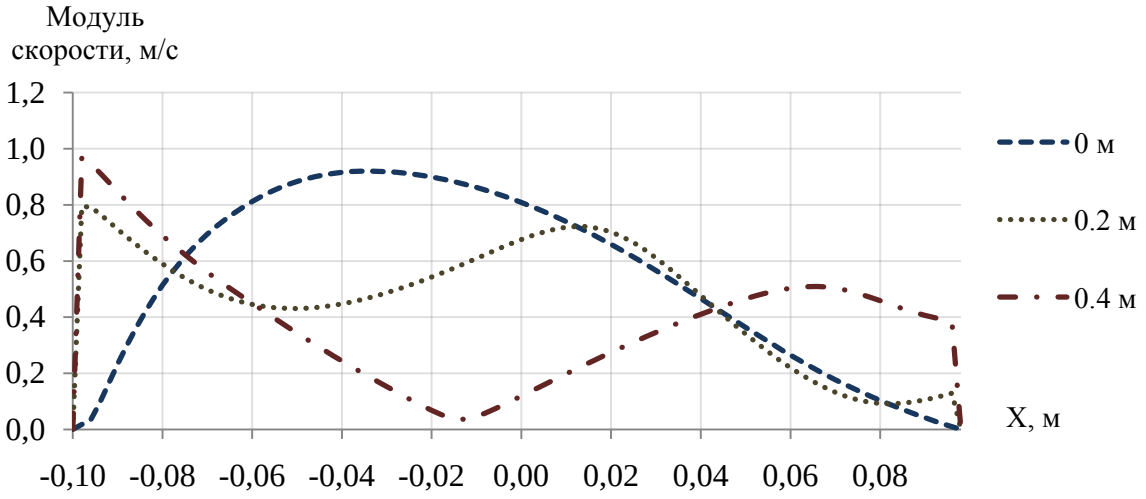
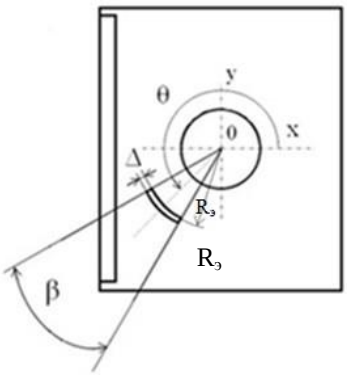
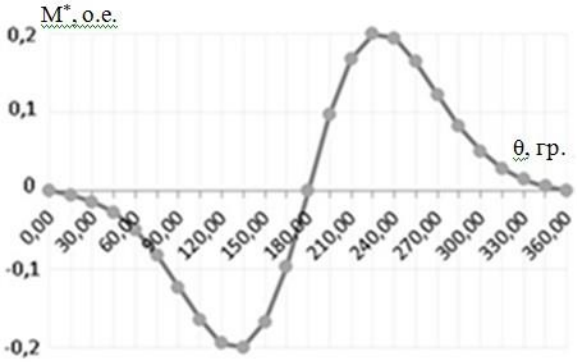


Рисунок 2.9 – Распределение скорости по диаметру канала, в зависимости от смещения канала

Из графиков (рисунок 2.9) видно, что циркуляция металла становится одноконтурной при смещении канала более чем на 0,2 м, относительно центральной оси.

Электромагнитный экран. Использование электромагнитного экрана (рисунок 2.10 а) позволяет создать несимметричное распределение электромагнитных сил в сечении канала с жидким металлом, что позволяет изменить характер циркуляции канала. Величина вращающего момента жидкого металла в канале, будет зависеть от следующих параметров: от радиуса экрана $R_э$, от угла разворота экрана β, от положения экрана в расчетной системе координат (угол θ) и его толщины Δ(рисунок 2.10, б). Расчеты проведены при значении β=30 градусов; $R_э$ = 0,16 м. Зависимость относительного момента вращения M^* от угла θ представлена на рисунке 7 б. Максимальное значение момента возникает при θ=135° и θ=225°, при этом при переходе от одного угла к другому вращение момента изменяется на противоположное. Зависимость момента от толщины экрана представлено на рисунке 2.11.





а б

Рисунок 2.10 – Электромагнитный экран:

а – эскиз ИЕ с электромагнитным экраном;

б – зависимость относительного момента от угла θ

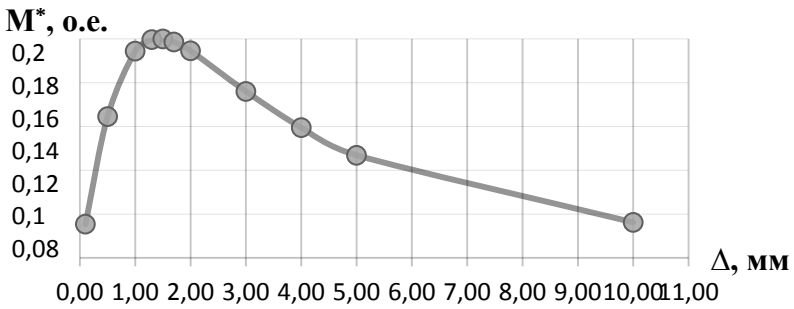


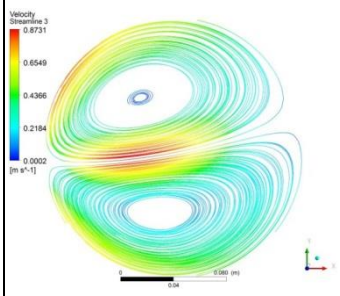
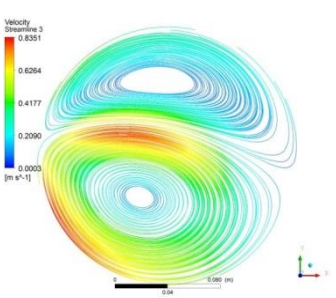
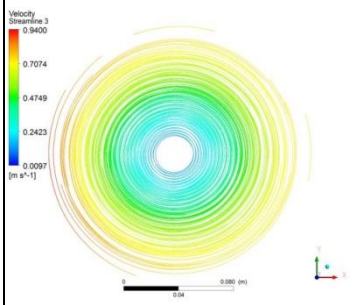
Рисунок 2.11 – Зависимость момента от толщины экрана Δ

Максимальное значение электромагнитного момента, при частоте 50 Гц, возникает при толщине экрана приблизительно равным Δ=1,5 мм.

Далее рассмотрим устройства с дополнительными катушками на ярмах магнитопровода и сверху обмотки индуктора.

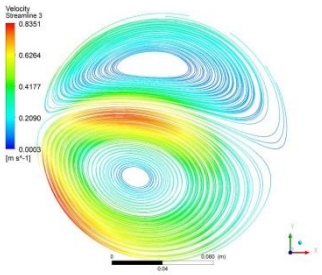
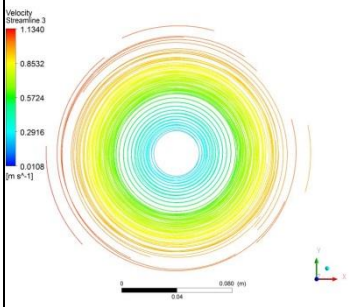
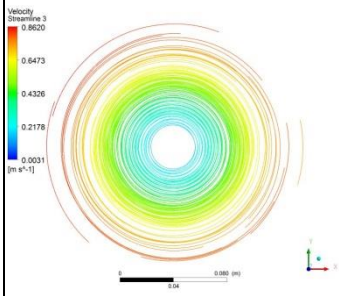
Зависимость средних скоростей и поля скоростей от угла раскрытия экрана приведено в таблице 2.

Таблица 2 – Поле скоростей и средние скорости в канале в зависимости от угла раскрытия экрана.

Угол раскрытия экрана	15	30	45
Средняя скорость, м/с	0,395	0,360	0,605
Поле скоростей течения металла в канале			

Для создания вращения может использоваться сектор экрана, рассматривался угол сектора в 30 градусов, положение сектора относительно канала регулирует течения и скорость в канале. Зависимость поля скоростей и средних скоростей в канале представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Поле скоростей и средние скорости в канале в зависимости от положения сектора экрана.

Положение сектора экрана	0-30	30-60	60-90
Средняя скорость, м/с	0,94	1,133	0,862
Поле скоростей течения металла в канале			

Электромагнитный экран служит препятствием для проникновения поля от главной катушки ИЕ в канал. Зависимость активной и реактивной мощностей выделяемой в металле канала от угла раскрытия экрана приведено на рисунке 2.12.

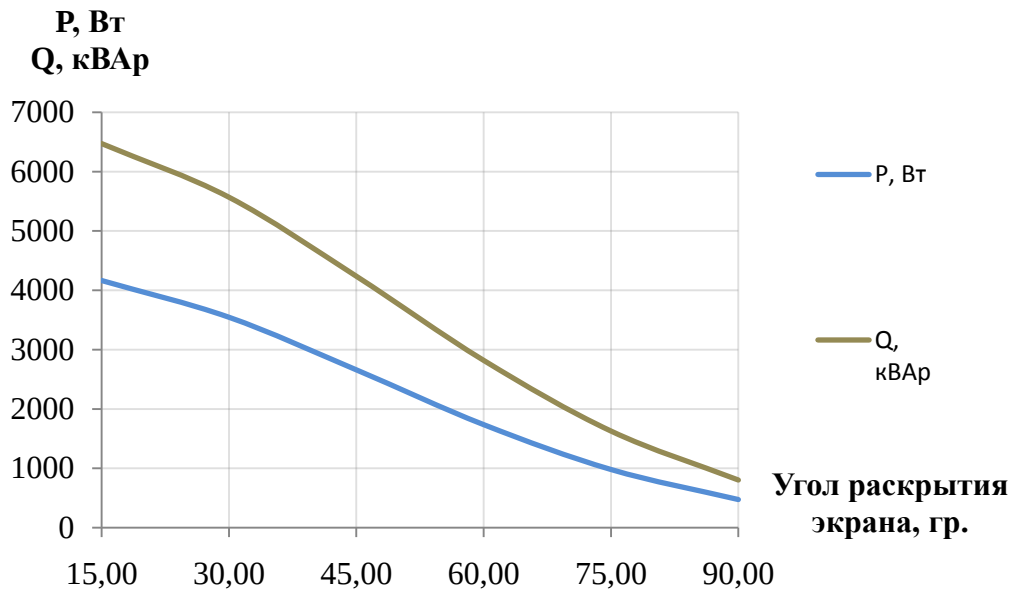


Рисунок 2.12 – Положение электромагнитного экрана над каналом

Зависимость средней и максимальной скоростей движения металла в зависимости от угла ракрытия экрана на рисунке 2.13.

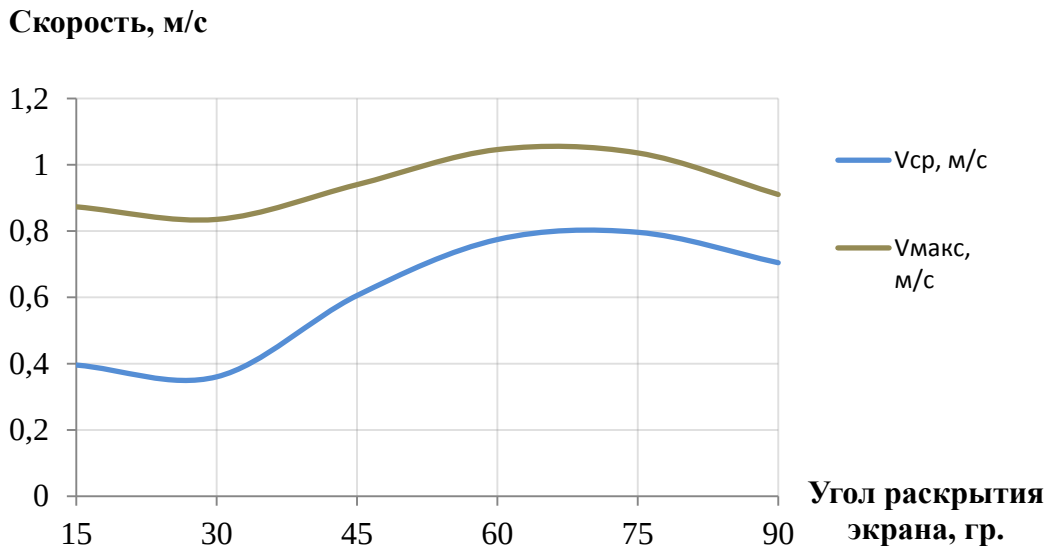


Рисунок 2.13 – Положение электромагнитного экрана над каналом

Использование электромагнитного экрана позволяет регулировать циркуляцию и скорости в канале в широком пределе, но накладывает особенность потери мощностей сэкранированных экраном.

Дополнительные катушки. Применение дополнительных магнитодвижущих сил (МДС) в области канала позволяет в широком пределе регулировать скорости вращения и подводить дополнительные мощности в металл канала. На рисунке 2.15 представлено расположение дополнительных катушек 2 на главной катушке 1, МДС в главной катушке составляет 15кА, в дополнительной катушке МДС изменялся от 0,5 до 2 кА. Сдвиг фазы тока в дополнительных катушках по отношению к току обмотки индуктора равен 90°. Вращение жидкого металла в канале возникает в результате наложения двух магнитных потоков, сдвинутых относительно друг друга в пространстве и по фазе. Магнитный поток рассеяния создаваемый обмоткой индуктора направлен вдоль оси ОУ, а магнитный поток дополнительных катушек направлен вдоль оси ОХ.

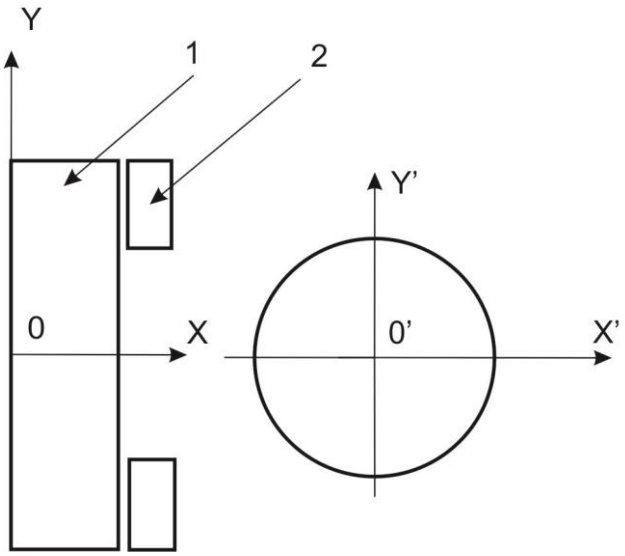


Рисунок 2.15 – Дополнительные катушки на главной катушке ИЕ

При расчете электромагнитных моментов во всех устройствах выполнялось то же условие что и в устройстве в виде седлообразной катушки. Сдвиг фазы тока в дополнительных катушках по отношению к току обмотки индуктора во всех устройствах равен 90°. На рисунке 2.16 показано как расположены дополнительные катушки.

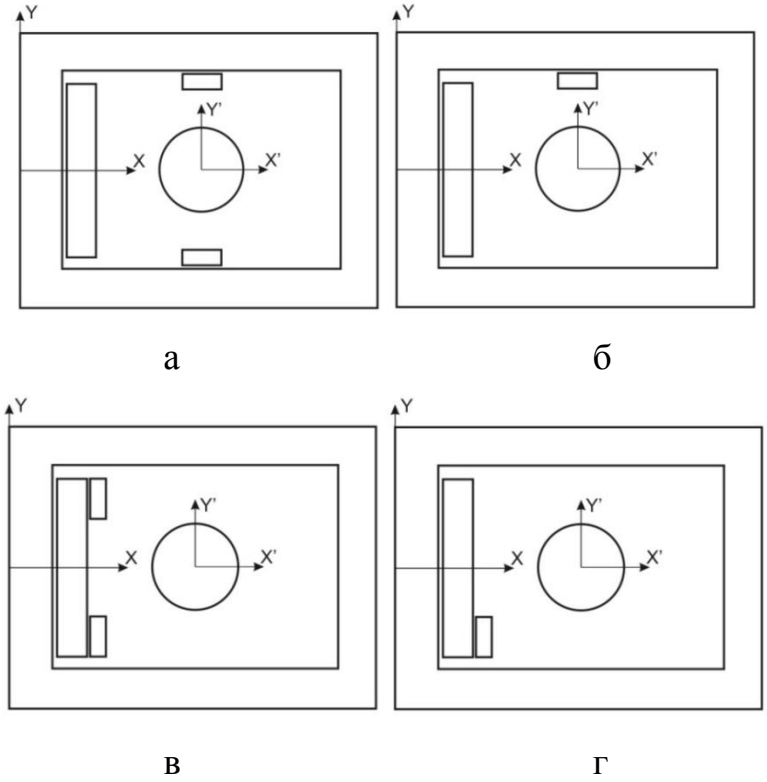
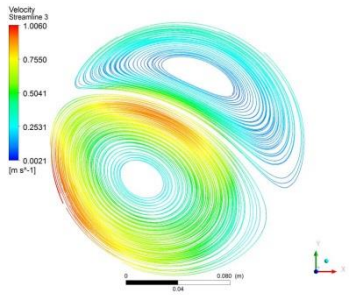
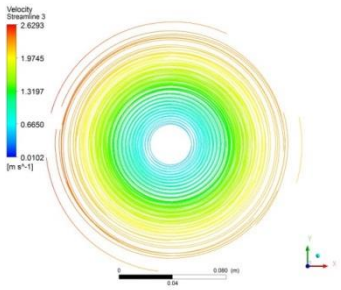


Рисунок 2.16 – Расположение дополнительных катушек (а) две катушки на ярмах; (б) одна катушка на ярме; (в) две катушки на индукторе; (г) одна катушка на индукторе

В таблице 4 приведены зависимости поля скоростей и средних скоростей от отношения МДС дополнительной катушке к МДС главной катушке.

Таблица 4 – Поле скоростей и средняя скорость в канале при использовании дополнительной МДС в ИЕ.

Отношение МДС дополнительной катушки к МДС главной катушки	0,0083	0,133
МДС дополнительной катушки, А	125	2000
Средняя скорость, м/с	0,43	1,91
Поле скоростей течения металла в канале		

Зависимость средней и максимальной скоростей течения металла в канале от МДС дополнительных катушек представлено на рисунке 2.17.

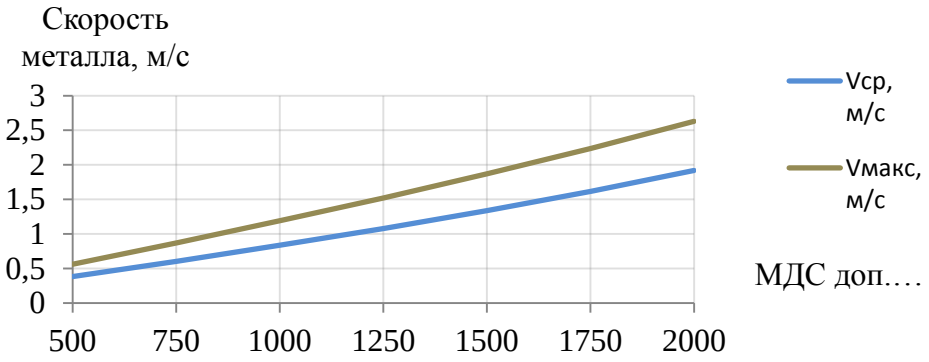


Рисунок 2.17 – Средняя и максимальная скорости течения металла в канале в зависимости от МДС дополнительных катушек

Профиль скорости по диаметру канала, по линии 0X в зависимости от МДС в дополнительных катушках представлено на рисунке 2.18.

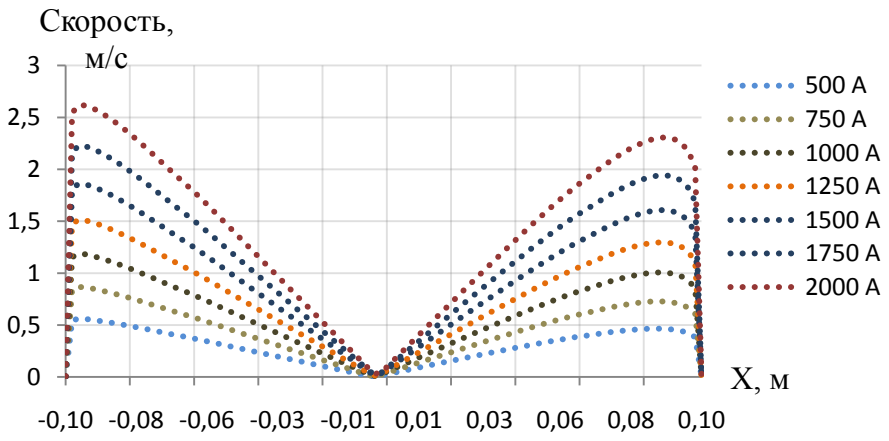


Рисунок 2.18 – Распределение скорости по диаметру канала, в зависимости от МДС в дополнительных катушках

Устройство дополнительных катушек позволяет в широком пределе регулировать скорость течения металла в канале. Подключение дополнительных катушек может быть осуществлено без использования внешних источников тока, а за счет взаимоиндукции дополнительных катушек и главной катушки ИЕ, в таком случае дополнительные катушки включаются параллельно с включением в их схему конденсатора, создающего сдвига фазы тока в них.

Результаты значений относительных моментов электромагнитных вращателей разного исполнения сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Относительные вращающие моменты от различных устройств

Устройства электромагнитного вращателя	Момент, о.е.
Седлообразная катушка на канале	1
Перемещение канала	0,02
Электромагнитный экран	0,21
Две дополнительные катушки на ярме	0,92
Одна дополнительная катушка на ярме	0,46
Две катушки сверху основной катушки	0,76
Одна катушка сверху основной катушки	0,35

Седлообразная катушка прижатая к футеровке канала с металлом является наиболее эффективным устройством создания вращающего момента, это происходит за счет расположения источника дополнительного магнитного поля в непосредственной близости к металлу, но техническое исполнение такого типа катушки весьма затруднительно. Устройства реализующие перемещение канала и электромагнитный экран не требуют дополнительного потребления электрической энергии, в отличие от катушек. Устройства с дополнительными катушками в системе ИЕ позволяют управлять величиной и направлением вращающего момента в широком диапазоне.

2.4 Вывод по разделу

1. Построена аналитическая модель индукционной единицы с электромагнитным вращателем, решения получены в виде рядов Фурье.
2. Получены дифференциальные и интегральные электромагнитные характеристики и построены графики их зависимостей от режимов работы.
3. Создана численная модель индукционной единицы с электромагнитным вращателем и проведен анализ электромагнитных и гидродинамических процессов в канальной части.
4. Проведено сравнение различных электромагнитных вращателей по эффективности вращения жидкого металла

3 Экспериментальное исследование физических процессов в ИКП

3.1 Общие замечания

Теоретические методы исследования физических процессов, протекающих в индукционных единицах, позволяют с определенной погрешностью определить электромагнитные характеристики как самих индукционных единиц, так и устройств для создания вращательного движения металла в каналах. Основанные на определенных допущениях, теоретические методы не позволяют учесть все конструктивные особенности ИЕ и вращателей, а так же процессов, протекающих в жидкометаллической среде. Поэтому, наряду с разработкой теоретических методов, необходимо проведение экспериментальных исследований на физических моделях.

3.2 Описание физической модели

Исследования электромагнитных процессов и эффективности ЭМВ проводились на физической модели ИЕ печи типа ИАК - 40. Модель выполнена в соответствии с принципами геометрического подобия в масштабе 1:5 к реальной. В качестве моделирующего металла использовался сплав Розе, имеющий приблизительно одинаковую удельную электропроводность с жидким алюминием ($\gamma_{Ro} = 1 \cdot 10^6$см/м) и низкую температуру плавления (t=94^0C).

Питание физической модели осуществлялось от трехфазного трансформатора с двумя однофазными лабораторными автотрансформаторами (ЛАТР), которые использовались для регулировки питающего напряжения.

Физическая модель представлена на рисунке 3.1. Установка состоит из канальной части и ванны. Канальная часть охватывает стержень индуктора с основной и дополнительными обмотками.

Рисунок 3.1 – Модель индукционной единицы

Элементы физической модели индукционной единицы.

Канальная часть (рисунок 3.2) изготовлена из нержавеющей стали. Имеет 2 продольных канала, один поперечный канал и один соединительный канал, расположенный в ванне. Диаметр продольных каналов 35мм, их высота 140мм. Длинна поперечного канала 115мм. В одном из продольных каналов располагается устройства для измерения скорости вращения расплава.

Рисунок 3.2 – Канал индукционной единицы

Индуктор индукционной единицы состоит из шихтованного магнитопровода (рисунок 3.3) и двух дополнительных обмоток, расположенных на стержне, охваченном канальной части. Магнитопровод, высотой 80 мм, шириной 180, длинной 243, состоит из листов электротехнической стали.

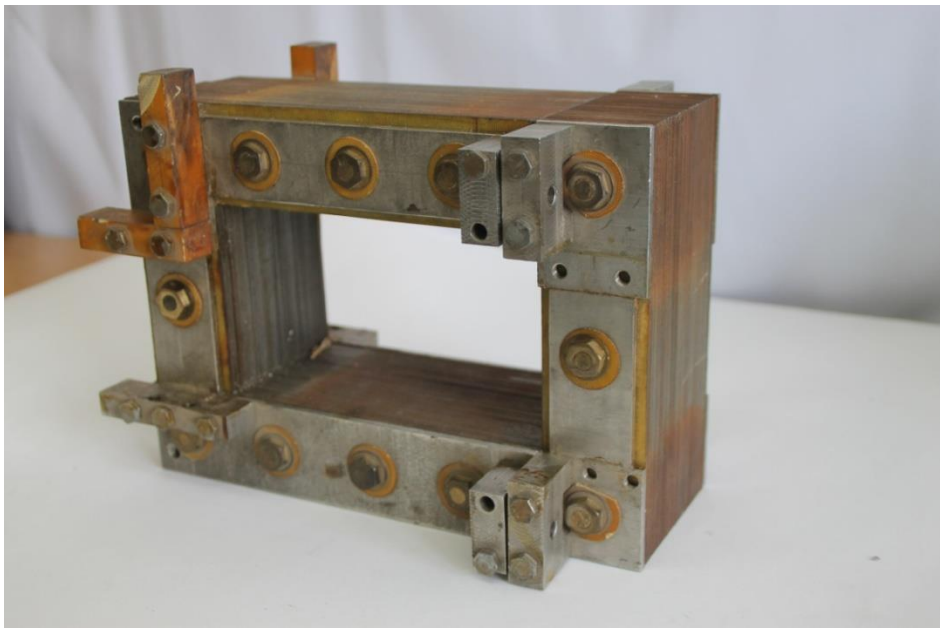


Рисунок 3.3 – Магнитопровод

Основная катушка (рисунок 3.4) выполнена из медной проволоки диаметром 1,7 мм, намотана на каркас из электрокартона и имеет 335 витков. Каркас с катушкой одевается на стержень магнитопровода.

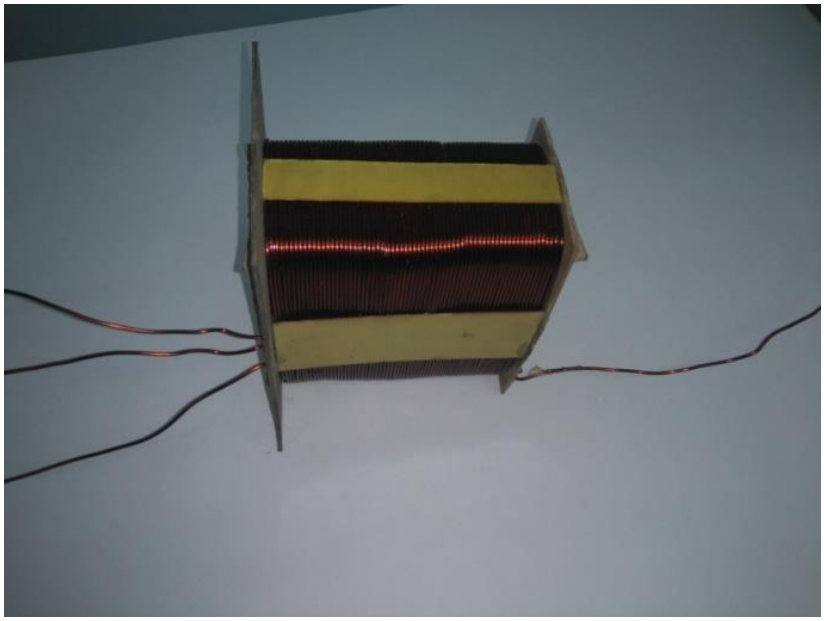


Рисунок 3.4 – Основная катушка

Дополнительная катушка, выполненная из 2 секций так же намотана на каркасы из электрокартона (рисунок 3.5) медной проволокой диаметром 1,7 мм имеет имеет 300 витков. Каркасы с секциями дополнительной катушки свободно одеваются на основную катушку.

Рисунок 3.5 – Корпуса для обмоток

На рисунке 3.6 представлены обмотки в намотанные медным проводом толщиной 1,7 мм в диаметре.

Рисунок 3.6 – Обмотки в намотанном виде

В сборе индуктор изображен на рисунке 3.7. Дополнительная катушка в виде двух секций одета на основную обмотку, которая, в свою очередь, одета на магнитопровод

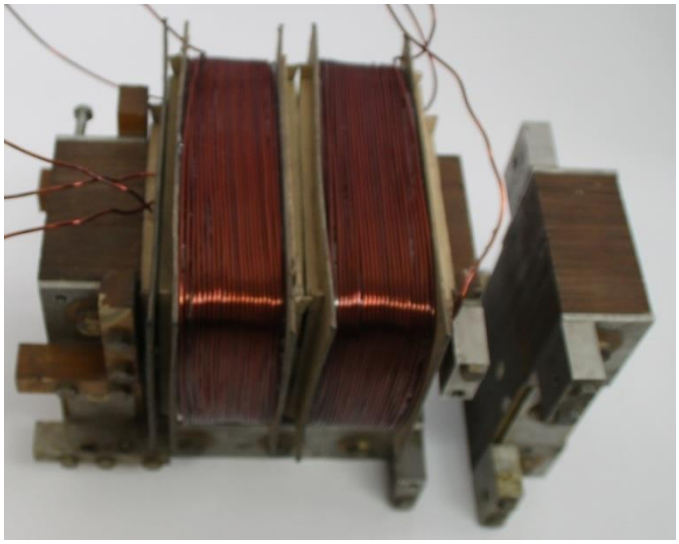


Рисунок 3.7 – Индуктор в собранном виде

На рисунке 3.7 представлена канальная часть в сборке с индуктором. Канальная часть охватывает стержень индуктора с обмотками. Устройство для измерения скорости вращения расплава в канале располагается в окне магнитопровода индуктора.

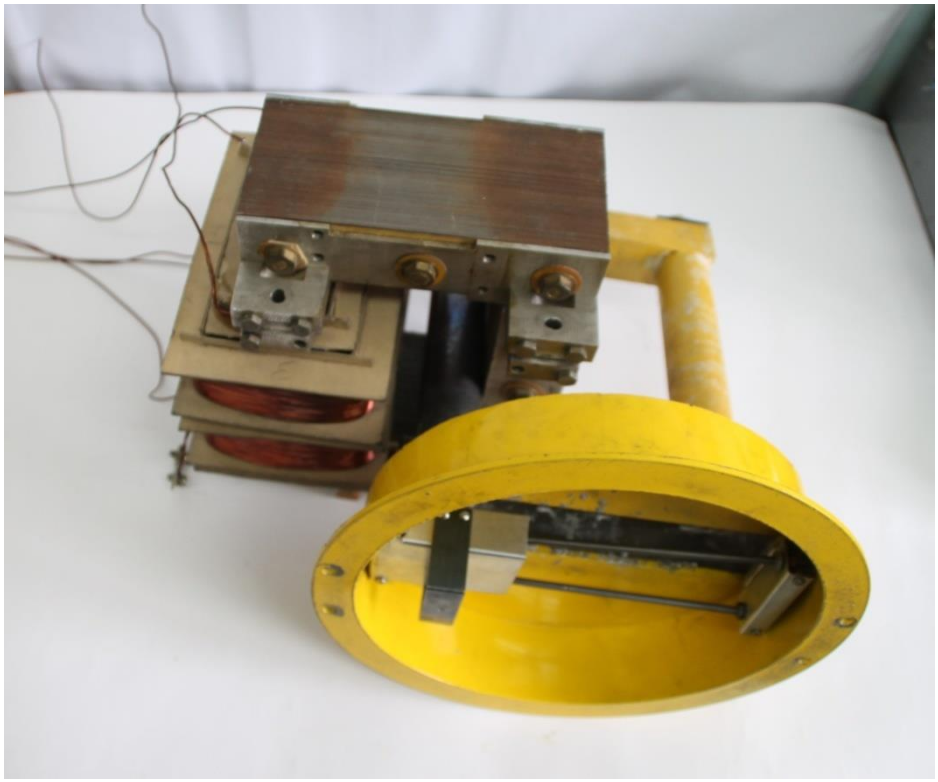
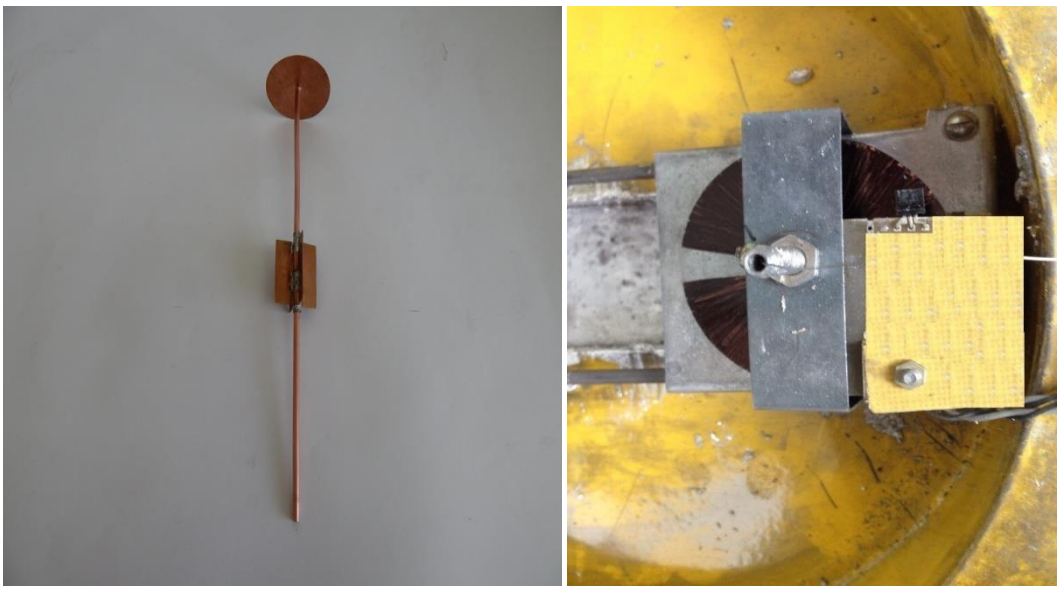


Рисунок 3.7 – Канальная часть в сборе с индуктором

Для измерения скорости вращения расплава в продольном канале выполнено специальное устройство. Устройство состоит из медной трубки с лопастями (рисунок 3.8 а). Трубка одевается на струну, расположенную на оси продольного канала, один конец струны закреплен в нижней части продольного канала с помощью натяжного болта, а другой конец в верхней части натяжным болтом (рисунок 3.8 б). В верхней части медной трубки закреплен латунный диск с разрезом, позволяющий фиксировать количество оборотов диска.



а б

Рисунок 3.8 – Устройство для измерения скорости вращения металла в канале индукционной единицы

Вид ванны ИЕ сверху с устройством измерения представлен на рисунке 3.9

Рисунок 3.9 – Ванна с устройством для измерения скорости вращения металла (вид сверху)

На рисунке 3.10 изображен индикатор количества оборотов диска «Веха-Т» с возможностью измерять количество импульсов в секунду, в минуту и в час.

Рисунок 3.10 – Тахометр-частотомер

Установка в сборе с измерительными приборами и автотрансформаторами представлена на рисунке 3.11.

Рисунок 3.11 – Понижающий автотрансформатор, автотрансформаторы, измерительные приборы и ИЕ с ЭМВ

Схема подключения основной и дополнительных катушек к автотрансформаторам с измерительными приборами представлена на рисунке 3.12

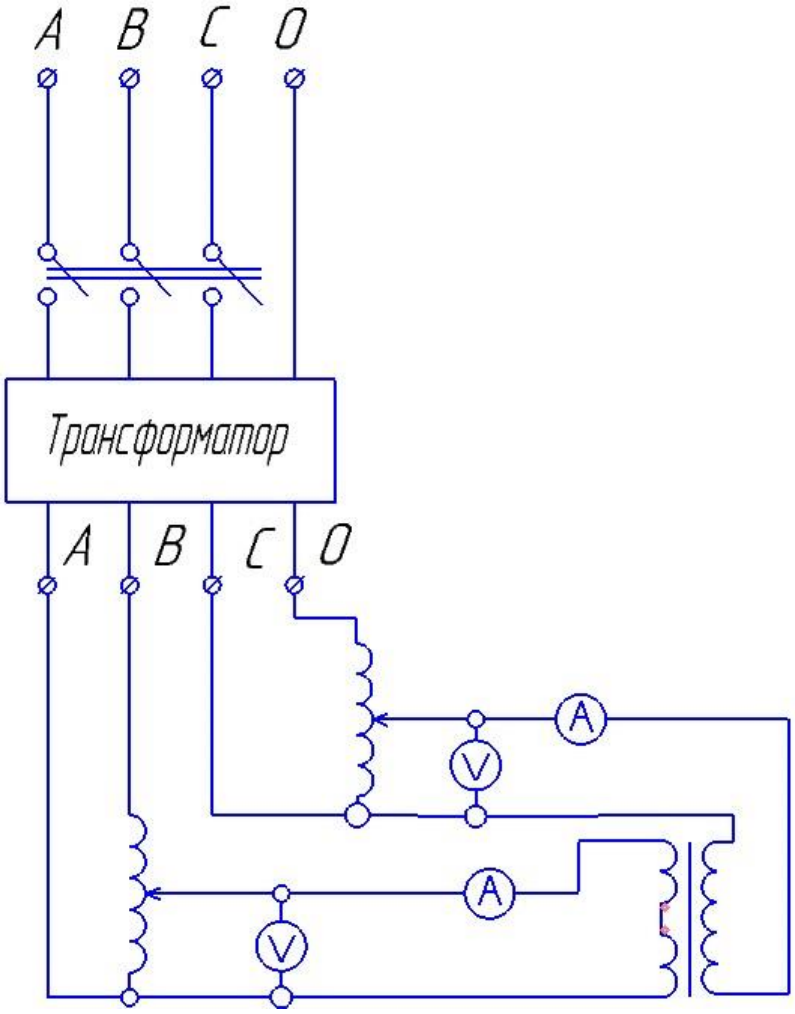


Рисунок 3.12 – Схема подключения основной и дополнительных катушек к автотрансформаторам с измерительными приборами

Автотрансформатор, питающий основную обмотку подключен к фазному напряжению О – С, а автотрансформатор, питающий дополнительную обмотку подключен к линейному напряжению А – Б. Такое подключение обеспечивает сдвиг фаз напряжения на основной и дополнительной катушках близко к 90 градусов

3.3 Экспериментальное исследование на физической модели

На физической модели выполнены измерения скорости вращения жидкого металла в зависимости от токов в основной и дополнительных катушках.

Измерения скорости вращения металла в канале осуществлялось с помощью системы, представленной на рисунке 3.13.

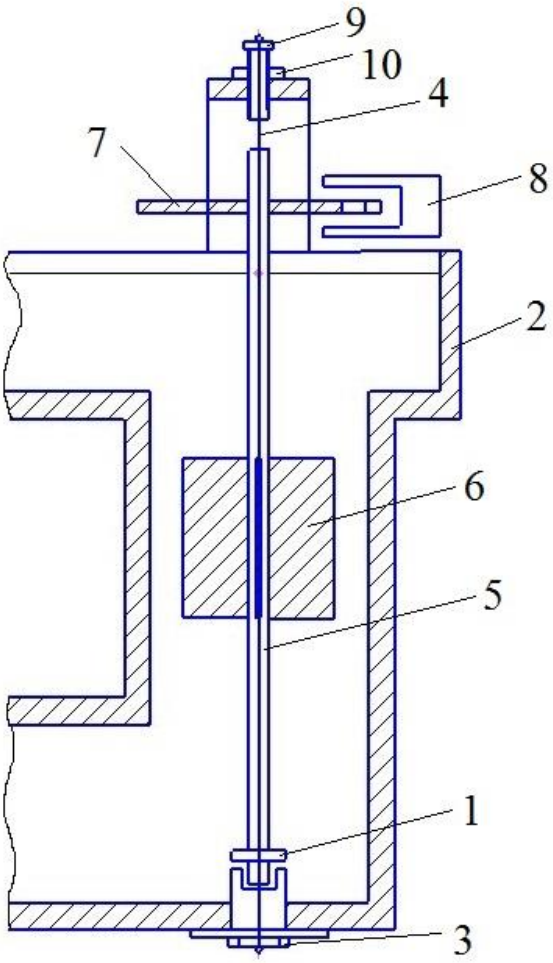


Рисунок 3.13 – Система для измерения скорости вращения расплава в канале индукционной единицы.

По оси канала натянута струна 4 и закреплена в нижней части опорным - 1 и натяжным – 3 болтами, в верхней части натяжным болтом 9 и стопорной гайкой 10. На струну одета медная трубка 5, на которой имеются лопасти. Изменяя питающее напряжение можно измерять скорость вращения жидкого металла при определенном токе в катушках.

Скорость измеряется с помощью диска 7 с отверстием и фотодатчика 8. Фотодатчик фиксирует сигнал в зависимости от скорости вращения диска 7 и передает на тахометр-частотомер.

С целью подтверждения достоверности математического моделирования проведены опыты на физической модели. Построены графики зависимостей скорости вращения расплава от силы тока в обмотках.

Опыт при различных значениях электрического тока в основной и дополнительных обмотках.

1. Частота питающего напряжения 50 Гц. Ток в доп катушке I2 = 10А (const). Ток в основной катушке изменялся от 0 до 5. Результаты измерения представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – результаты эксперимента при I2 = 10 А

I1 (А)	I2 (А)	U1 (В)	U2 (В)	V (м/сек) Физ. модель	V (м/сек) Мат. модель
0	10	0	26	0	0
1	10	37	26	0	0,0979
2	10	72	26	0,1256	0,1557
3	10	107	26	0,1884	0,2056
4	10	142	26	0,2512	0,2197
5	10	179	26	0,2983	0,249

Зависимость скорости вращения расплава от величины тока в основной катушке представлена на рисунке 3.14.

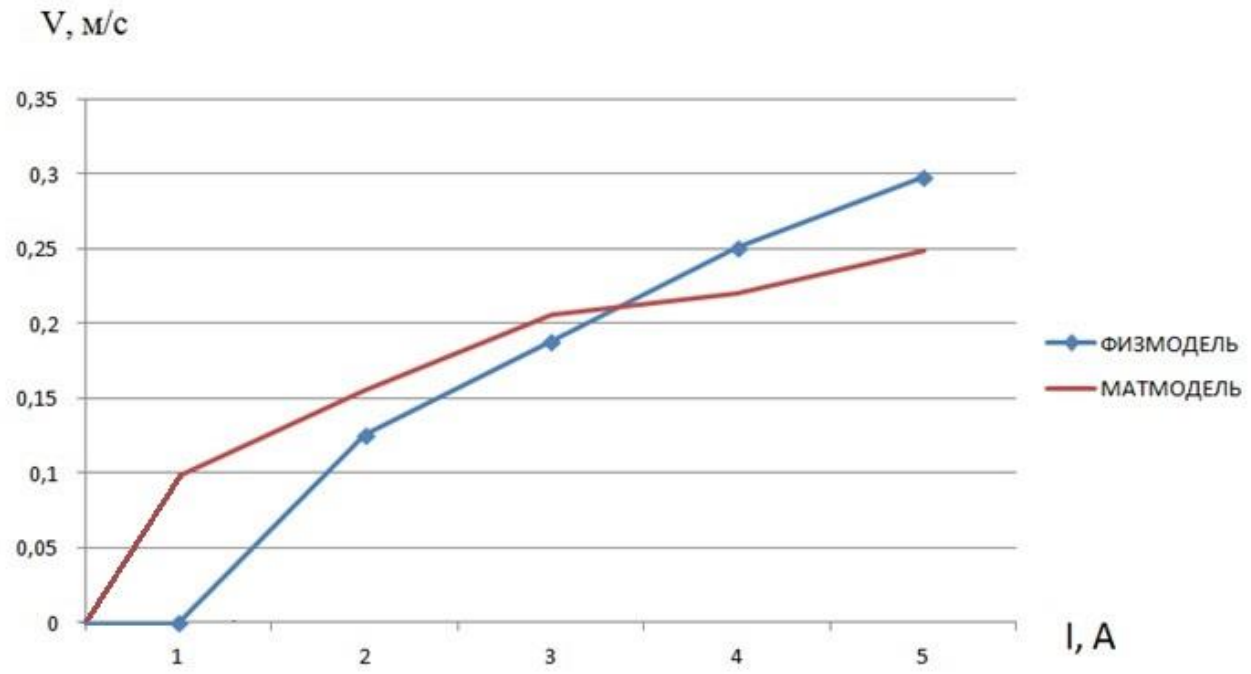


Рисунок 3.14 – Зависимость скорости вращения расплава от величины тока в основной обмотке

2. Частота питающего напряжения 50 Гц. Ток в дополнительной катушке I2 = 5A (const). Ток в основной катушке изменялся от 0 до 5. Результаты измерения представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 - результаты эксперимента при I2 = 5 A

I1 (A)	I2 (A)	U1 (B)	U2 (B)	V (м/сек) Физ. модель	V (м/сек) Мат. модель
0	5	0	12	0	0
1	5	35	12	0	0,0633
2	5	69	12	0	0,0978
3	5	104	12	0	0,1331
4	5	140	12	0,1021	0,1538
5	5	174	12	0,1727	0,1884

Зависимость скорости вращения расплава от величины тока в основной катушке представлена на рисунке 3.15.

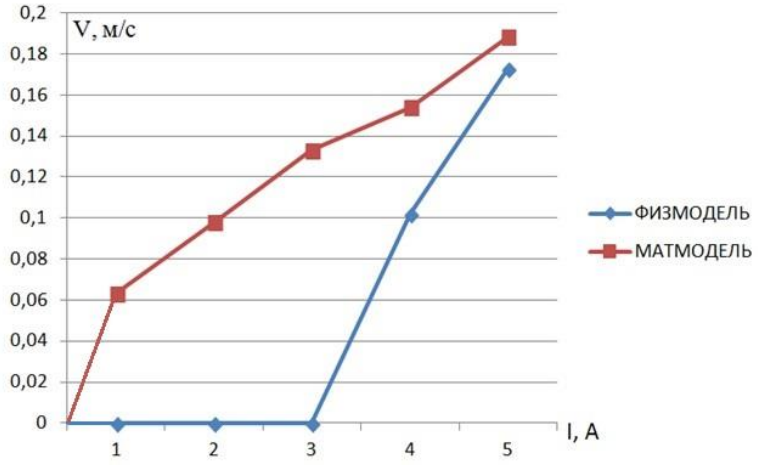


Рисунок 3.15 – Зависимость скорости вращения расплава от величины тока в основной катушке.

3. Частота питающего напряжения 50 Гц. Ток в основной катушке I2 = 5A (const). Ток в дополнительных катушках изменялся от 0 до 8. Результаты измерения представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 - результаты эксперимента при I1 = 5 A

I1 (A)	I2 (A)	U1 (B)	U2 (B)	V (м/сек) Физ. модель	V (м/сек) Мат. модель
5	0	176	0	0	0
5	1	176	1	0	0,0689
5	2	176	3	0	0,1005
5	3	176	7	0	0,139
5	4	176	10	0,1335	0,1522
5	5	176	12	0,1963	0,1713
5	6	176	15	0,2041	0,2042
5	7	176	19	0,2198	0,2196
5	8	176	22	0,2355	0,2234
5	9	176	24	0,2591	0,2357
5	10	176	27	0,2748	0,249

Зависимость числа оборотов диска от величины тока в дополнительных катушках представлена на рисунке 3.16.

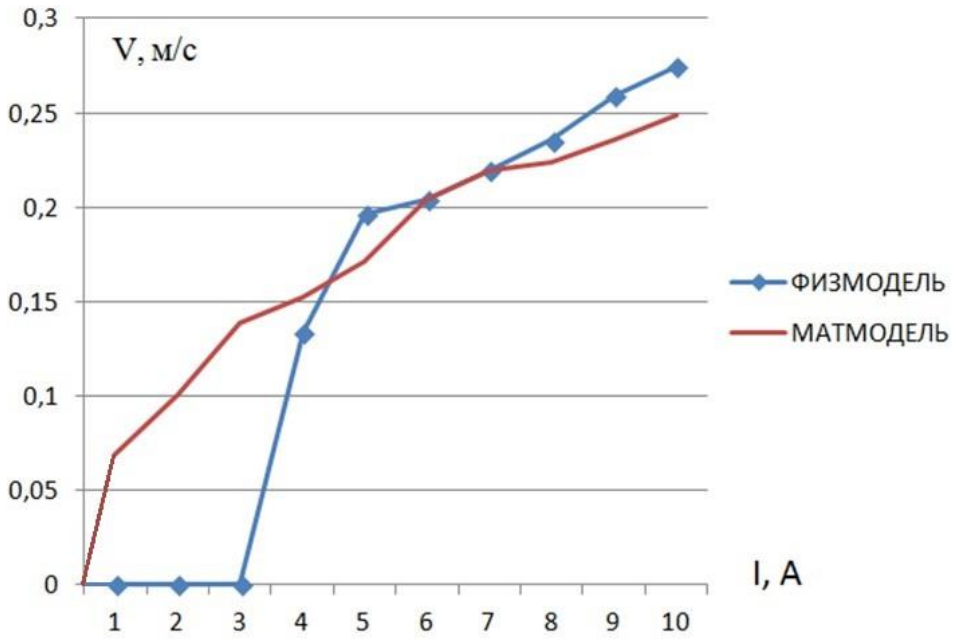


Рисунок 3.16 – Зависимость скорости вращения расплава от величины тока в дополнительных катушках

Отличие расчетной зависимости от экспериментальной вызвана тем, что на физической модели из за трения и вязкости системы измерения, вращение фиксируется с определенной величины тока в дополнительной обмотке (I > 3А),а в математической модели вращающий момент появляется при (I > 0)

3.4 Выводы по разделу

1. Разработана и создана физическая модель индукционной единицы с МГД – вращателем в виде дополнительных катушек на магнитопроводе.
2. Разработана и реализована система, для измерения скорости расплава в канале индукционной единицы
3. Экспериментально получены зависимости числа оборотов жидкого металла в канале от величин токов в основной и дополнительной обмотках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих устройств электромагнитных вращателей расплава в индукционных единицах. Выявлено, что преимущество имеет электромагнитный вращатель в виде дополнительных катушек, устройство позволяет регулировать скорость вращения расплава и не требует существенной переделки конструкции индукционной единицы.

2. Вращательное движение расплава в канал увеличивает тепломассообмен между канальной частью и ванной печи, уменьшает зарастание каналов окислами. Применение МГД-вращателя позволяет регулировать направление вращения и его скорость в широком диапозоне.

3. В результате анализа электромагнитных процессов на аналитической модели индукционной единицы получены дифференциальные и интегральные электромагнитные характеристики ИЕ с ЭМВ.

4. Построена численная двухмерная модель ИЕ с МГД-вращателем. Проведены анализы электромагнитных и гидродинамических.

5. Проведено сравнение различных электромагнитных вращателей по эффективности создания вращательного момента. Наиболее эффективными являются седлообразная катушка и дополнительные катушки, расположенные на магнитопроводе.

6. На основе результатов математического моделирования разработана и построена физическая модель индукционной единицы с МГД-вращателем в виде дополнительных катушек, одетых на основную обмотку.

7. Полученные расчетные экспериментальные данные могут быть использованы для разработки и проектирования опытно-промышленной единицы с электромагнитным вращателем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с. 1206902 СССР, кл, Н 02 К 17/04, 1978. Способ вращения электропроводного тела / Ю.М. Гориславец, А.Ф. Колесниченко, А.А. Темеров, В.Н. Тимофеев и Р.М. Христинич. (СССР). №3629054/24-07; заявл. 29.01.83 ; опубл. 23.01.86. Бюл. № 3. – 2 с.

2. А.с. 1213826 Отъемная индукционная единица. 1985

3. А.с. 1195168 СССР, кл, F 27 D 11/06, 1981. Отъемная индукционная единица / В.Н. Тимофеев, А.А. Темеров, Ю.М. Гориславец, А.Ф. Колесниченко и Р.М. Христинич. (СССР). №3117363/22-02; заявл. 30.03.84 ; опубл. 30.11.85. Бюл. № 44. – 2 с.

4. А.с. 1300284 СССР, кл, F 27 D 1/00, 1975. Отъемная индукционная единица / С.А. Бояков, В.А. Золотухин, А.А. Темеров и Р.М. Христинич. (СССР). №3922294/22-02; заявл. 22.05.85 ; опубл. 30.03.87. Бюл. № 12. – 4 с.

5. А.с. 1469274 СССР, кл, F 27 D 11/06, 1985. Отъемная индукционная единица / В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич, С.А. Бояков, А.А. Темеров, Р.Ф. Куртбединов и И.Г. Рясик (СССР). №4243510/31-02; заявл. 12.05.87 ; опубл. 30.031.89. Бюл. № 12. – 3с.

6. А.с. 1669254 СССР, кл, F 27 D 11/06, 1987. Отъемная индукционная единица / В.Н. Тимофеев, С.А. Бояков, Р.М. Христинич, А.А. Темеров. (СССР). №4714970/02; заявл. 17.04.87 ; опубл. 04.07.89. Бюл. № 11. – 3с.

7. Электротермическое оборудование : Справочник / Под общ. ред. А.П. Альтгаузена. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 416 с., ил.

8. Электрические печи и установки индукционного нагрева. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. М., «Металлургия», 1979. 247 с.

9. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. Вайнберг А.М. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.

10. Брокмайер К. Индукционные плавильные печи./ Пер. с нем; Под ред. М.А. Шевцова. – М.:Энергия, 1972. – 303 с.

11. Тимофеев, В.Н. МГД технологии в металлургии / В.Н. Тимофеев, Е.А. Павлов, М.В. Первухин, С.П. Тимофеев, М.Ю. Хацаюк // МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс специализация IV. – Санкт-Петербург; изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. – 250 с

12. Тимофеев В.Н. Электромагнитные вращатели, перемешиватели и дозаторы алюминиевых расплавов : диссертация доктора технических наук : 05.05.03 – Красноярск, 1994. – 413 с.: ил.

13. Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю.: Управление конвективными потоками расплава в канальной части индукционной печи, Известия академии наук. Энергетика, 2013. – 130с.

14. Гельфгат, Ю.М. Жидкий металл под действием электромагнитных сил / Ю.М. Гельфгат, О.А. Лиелаусис, Э.В. Щербинин // Жидкий металл под действием электромагнитных сил – Рига, изд. Зинатне, 1995. – 248 с

15. Альтгаузен, А.П. Электротермическое оборудование / А.П. Альгаузен, М.Я. Смелянский, М.С. Шевцов // Электротермическое оборудование, справочник – Москва, изд. Энергия, 1967. – 487 с.

16. Вольдек, А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А. И. Вольдек. – Л.: «Энергия», 1970. – 272 с.

17. Индукционные канальные печи: Учебное пособие. 2-е изд. доп. / Л.И. Иванова, Л.С. Гробова, Б.А. Сокунов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ- УПИ, 2002. 105 с.