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

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Электротехнологии и электротехники»

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

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ЗАЛИВОЧНЫЙ КАРМАН С МГД ВРАЩАТЕЛЕМ РАСПЛАВА

Научный руководитель	_____	к.н.т., доцент	Хацаюк М.Ю.
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		Синяков Г.В.
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	главный конструктор	Перфильев С.Н.
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа Магистерской Диссертации по теме
Заливочный карман с МГД вращателем расплава

Нормоконтролер _____ Первухин М.В.

подпись, дата инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Заливочный карман с МГД вращателем расплава» содержит 60 страницу текстового документа, 37 рисунков, 9 таблиц, 24 формулы, 22 использованных источника.

Обзор существующих устройств, постановка задачи, принцип действия заливочного кармана, устройство заливочного кармана плавильной печи, математическая модель электромагнитных процессов, математическая модель магнитогидродинамических процессов, результаты моделирования, экспериментальные исследования индуктора

Целью данной выпускной квалификационной работы являлся расчет дугового индуктора и оптимизация его параметров для увеличения эффективности замешивания стружки.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ……..……...….....5
1 Обзор существующих МГД устройств и плавильных печей для переработки вторичного алюминия.....9
1.1 Постановка задачи.....28
1.2 Принцип действия заливочного кармана.....29
1.3 Устройство заливочного кармана плавильной печи.....30
1.4 Выводы по разделу.....32
2 Математическое моделирование.....33
2.1 Математическая модель электромагнитных процессов.....33
2.2 Математическая модель магнитогидродинамических процессов.....38
2.3 Результаты моделирования.....42
2.4 Выводы по разделу.....46
3 Экспериментальные исследования индуктора.....47
3.1 Выводы по разделу.....56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....58

ВВЕДЕНИЕ

Всё чаще заказчики литья требуют от литейных предприятий обработанные отливки. Однако механическая обработка отливок связана с образованием большого количества стружки. Переработка стружки на литейном предприятии может быть очень интересна с точки зрения рентабельности, если правильно подобрать систему ресайклинга, т.е. переработки стружки.

Однако есть преимущества, которые говорят только в пользу переработки стружки на литейном предприятии. Например, можно экономить на приобретении блочного материала, чаще в форме чушек. Экономия ещё выше, когда используются специальные и поэтому дорогие сплавы. В данном случае, благодаря переработке стружки, сплав остаётся в «собственном доме». Другой момент – это регенерация охлаждающей жидкости, используемой при механической обработке. Отпадает также проблема промежуточного складирования стружки. Сокращаются пути транспортировки. Не надо заниматься реализацией стружки. Когда же переработка стружки уже отлажена и процесс стал рутинным, то можно дешево покупать стружку на стороне, чтобы ещё больше повысить рентабельность и увеличить прибыль. Но надо назвать и недостатки переработки стружки на литейном предприятии. В первую очередь, это высокие инвестиции. Система переработки включает сбор и транспортировку стружки, подготовку и переплавку стружки и, как правило, очистку сбрасываемого воздуха. Процесс подготовки стружки для переплавки состоит из измельчения, сушки и отделения органических налипаний, отделения чёрного металла, а также просеивания. Надо также учитывать дополнительные расходы, в том числе на привлечение квалифицированного персонала для обслуживания. Необходим также дополнительный контроль качества алюминиевого расплава и в некоторых случаях, дополнительное легирование. Нельзя забыть так же необходимость промежуточного хранения

стружки при сбое в работе установки, так как чаще всего в наличии только одна установка переработки стружки.

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 использование коммерческих пакетов компьютерного моделирования, использующих метод конечных элементов для решения широкого спектра взаимосвязных 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 [20, 21].

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 выше недостатки делают вышеназванные пакеты доступными в основном для крупных коллективов НИИ, или для фирм, специализирующихся на решении подобных задач.

Актуальность работы. Высокого выхода годного металла можно достичь в том случае, когда стружка минимальное время контактирует с горячей поверхностью расплава, т.е. мгновенно поглощается расплавом. Это связано с тем, что в горячей, насыщенной кислородом атмосфере происходит оксидация поверхности стружки. Чем дольше стружка находится на поверхности, тем толще становится оксидный слой, а это, в свою очередь, осложняет отделение оксидов от металла; металл невозможно выплавить из стружки и его выход значительно сокращается. Таким образом, правильно выбранная технология плавки стружки является немаловажным успехом рентабельности переработки стружки.[1]

Другими факторами, влияющими на выход металла, являются сплав, форма и характеристики стружки. Отрицательно сказывается на выходе годного металла как высокий процент мелкой стружки, так и незначительная толщина стружки. Чем критичнее эти характеристики, тем важнее становится выбор технически совершенной системы переплавки стружки.

Одним из перспективных направлений повышения эффективности оборудования для переплавки вторичного алюминия является создание воронки в загрузочном кармане плавильной печи. Воронка будет обеспечивать погружение вторичного алюминия внутрь расплава плавильной печи.

Объект исследования - дуговой индуктор для создания воронки.

Предмет исследования - электромагнитные и гидродинамические процессы в электромеханической системе "индуктор карман" в процессе создания воронки

Цель работы: расчет дугового индуктора и оптимизация его параметров для увеличения эффективности замешивания стружки.

Задачи:

1. Проведение анализа и обобщение опыта эксплуатации существующего металлургического оборудования с использованием МГД воздействий на алюминиевый сплав.
2. Построение математических моделей, позволяющих проводить анализ связанных электромагнитных и гидродинамических процессов, выявить их влияния на электромагнитные параметры установки.
3. Проведение экспериментальных исследований на опытной установке.

1 Обзор существующих МГД устройств и плавильных печей для переработки вторичного алюминия

Литейные предприятия предпочтительно используют печи, производительность которых без учёта переплавки стружки составляет 500 - 1 000 кг/час. В качестве альтернативы используется также KombiMelter. При этом речь идёт о StrikoMelter® с системой Etamax-System® для плавки блоков и кускового возвратного материала. Такие печи имеют дополнительно карман для ввода стружки. Преимущество комбинированных печей - незначительное специфическое потребление энергии. Это объясняется тем, что тепло камеры печи используется для прогрева материала, закладываемого в шахту. Кроме этого такие печи позволяют организовать производство сплава с использованием одной установки в относительно небольшом помещении. Достаточно большой размер камеры выдержки печи позволяет с одной стороны, плавить блоки, возвратный материал и стружку, а с другой стороны, поддерживать необходимую температуру расплава. Очистка расплава от оксидов и карбидов производится при помощи обработки Impeller в транспортирующем ковше перед заливкой в раздаточную печь. Для достижения максимального выхода металла StrikoWestofenGmbH использует насос для металла с системой Lotuss® производства MetaullicsSystemsCo., Солон/США. Система самым наилучшим образом отвечает требованиям технологии плавки стружки, так как позволяет вводить стружку непосредственно в расплав и плавить её – в сравнении с плавкой погружением – без присутствия воздуха.

Для этого на фронтальной стороне StrikoMelter® встроен карман из огнеупорного бетона, где размещается механический насос для металла, а также блок Lotuss® (рисунок 1) [1].

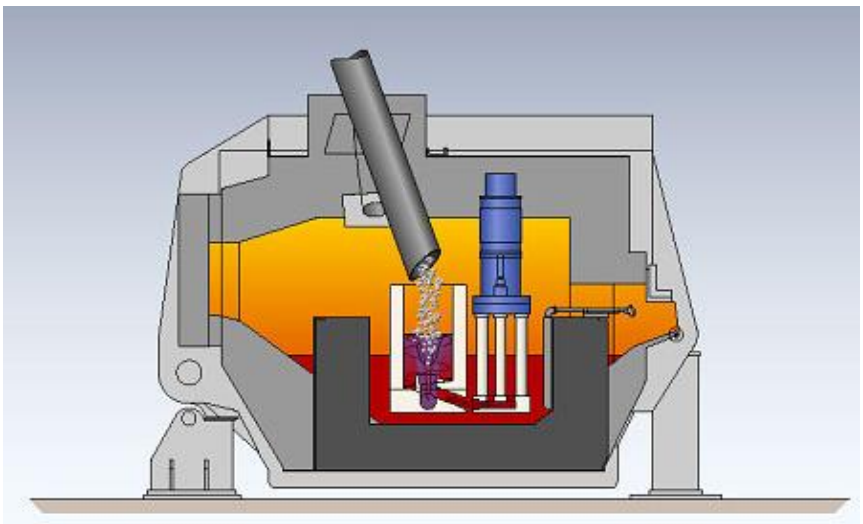


Рисунок 1 – Схема StrikoMelter® с системой Lotuss®

Система LOTUSS работает совместно с циркуляционным насосом расплавленного металла Metaullics. Металл перекачивается из основной камеры печи в круглый карман из огнеупорного материала. Конструкция кармана имеет уникальную форму, вызывающую образование направленной вниз воронки, увлекающей за собой металл. Этот характер перемещения металла увлекает за собой загружаемый лом, непрерывно подаваемый к верхней части системы LOTUSS при помощи транспортера, и он быстро погружается под поверхность металла. Металл затем направляется в карман для улавливания шлака, расположенный далее в технологическом потоке, в котором возможно добавление флюса. Поскольку загружаемый материал эффективно отделяется от шлаков, загрузка может производиться непрерывно даже во время добавления флюсов и удаления шлака [2].

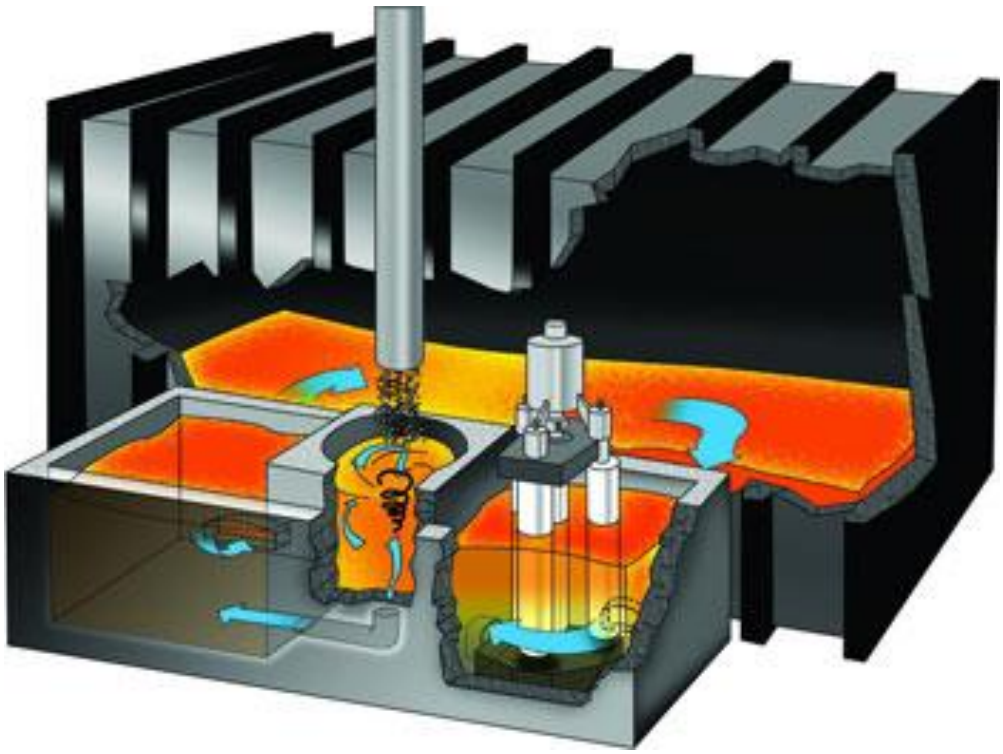


Рисунок 2 – Система LOTUSS с циркуляционным насосом расплавленного металла Metaullics

Преимущества системы LOTUSS:

- Высокий процент извлечения металла
- Максимальный объем выпуска металла
- Высокая производительность
- Рассчитано на непрерывную автоматизированную работу
- Возможность дооборудования существующих печей

Недостатки:

- Загрязнение металла материалом механических вращателей
- Требует регулярного частого технического обслуживания (износ вращателей, зарастание каналов)
- Высокая стоимость
- Большие массо-габаритные показатели

На рисунке 3 показана скорость плавления стружек с плотностью 192 кг/м^3. Стружки загружались в карман системы LOTUSS при помощи

вибрационного транспортера. Циркуляционный насос Metaullics L-35SD использовался для создания воронки и подавал горячий металл, необходимый для плавления.

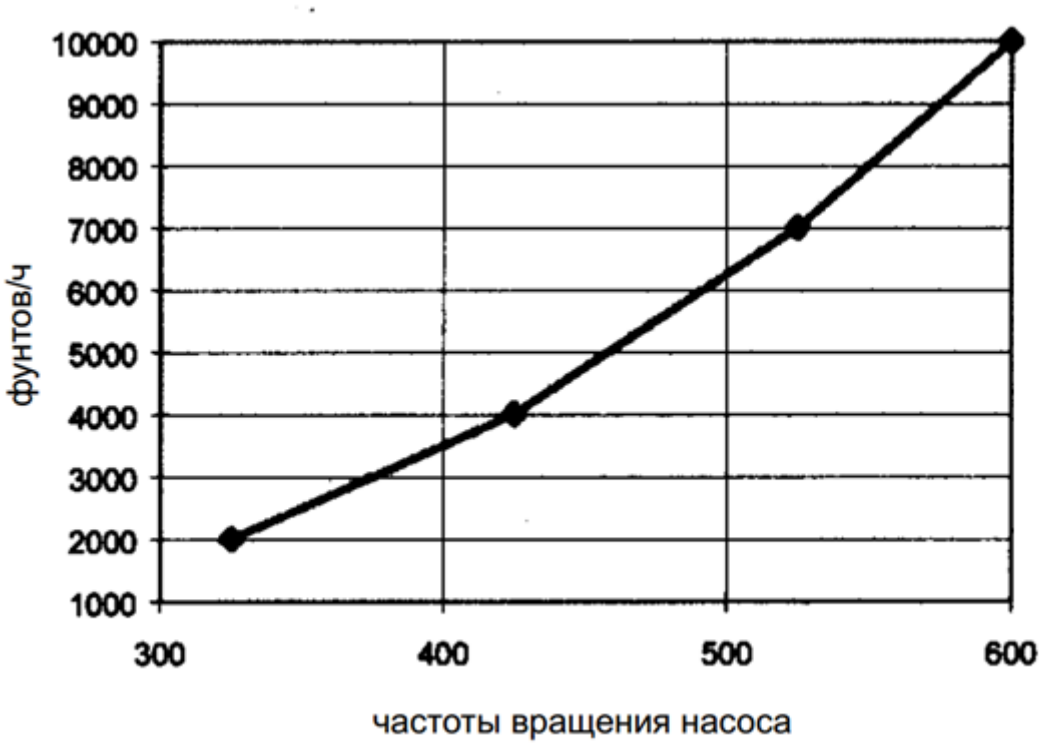


Рисунок 3 – Соотношение скорости плавления и частоты вращения насоса

Принцип работы электромагнитного насоса жидкого алюминия основан на принципе линейного двигателя. Магнитное поле бегущей волны, создаваемое специальной катушкой, после взаимодействия с расплавленным алюминием создает электромагнитную тягу. Электромагнитная тяга заставляет расплавленный алюминий формировать высокоскоростной джакузи с участием нижнего слова расплава обратный канал печи. Изменение напряжения будет влиять на размер и направление электромагнитной силы [3].

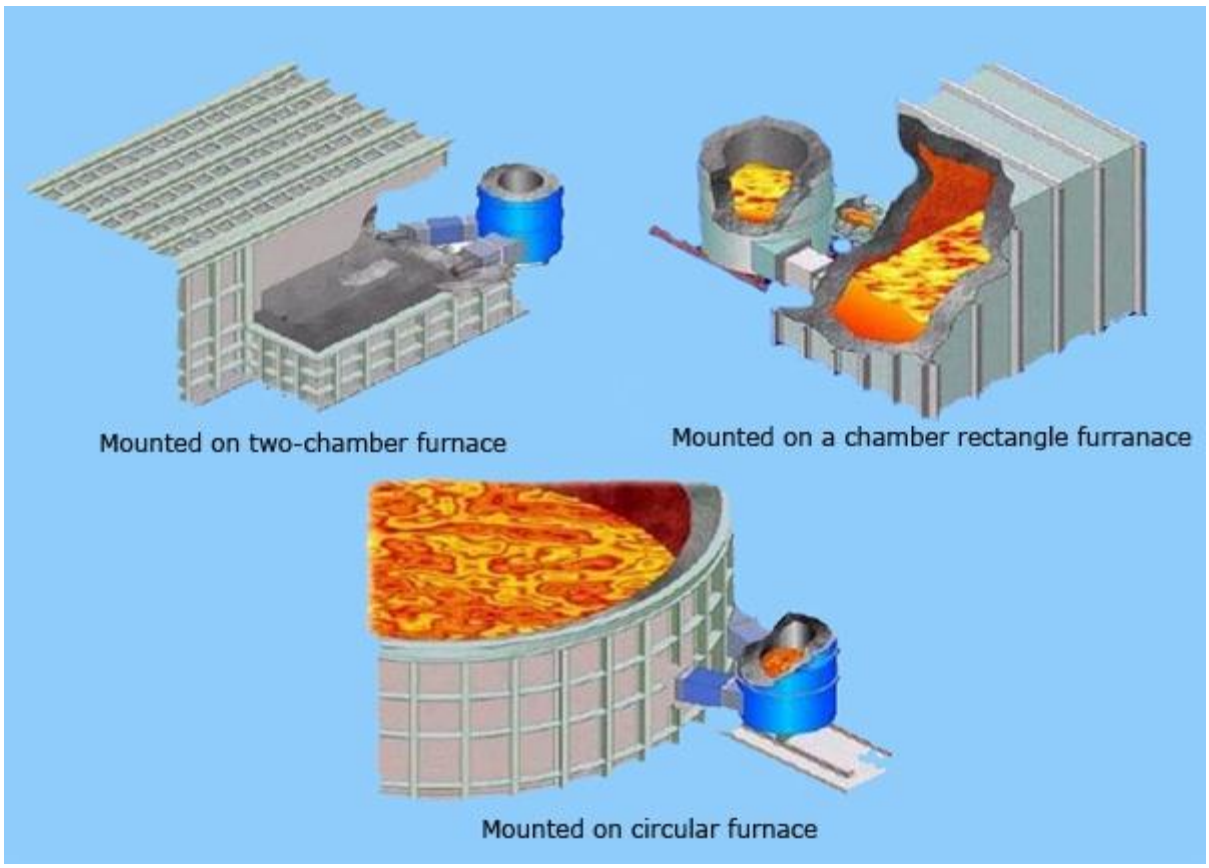


Рисунок 4 – Электромагнитный насос для жидкого алюминия

Преимущества:

- Равномерный химический состав
- Снижение окисленного шлака
- Сокращения времени плавления, повышенная эффективность производства
- Однородность температуры расплава

Основной недостаток представленных выше конструкций – наличие закрытых транспортных каналов. Из опыта эксплуатации канальных печей в алюминиевой промышленности широко известна проблема зарастания каналов. Недоступность каналов для чистки может быть причиной потери работоспособности устройства и остановки производственного процесса.

Наклонная цилиндрическая печь.

С момента разработки наклонной цилиндрической печи (рисунок 5) поставлено уже более 250 единиц печи. Наклонная цилиндрическая печь

применяется для плавки лома, алюминиевых чушек и алюминиевых отходов после литья. Этот вид лома имеет относительно высокую удельную плотность, что облегчает погружение материала в ванну после загрузки. Как правило, на поверхности лома остается некоторый остаток в виде смазки с пресс-формы, который выгорает при загрузке. Поэтому важно не допускать контакта кислорода с металлом для минимизации отложений окалины.

Типичные операции для данного вида печи включают в себя плавление для разного вида литья, в частности, для автомобильной промышленности, предусматривающие переработку собственного лома, а также в качестве плавильной печи вторичного цикла для переплавки чушек с различными характеристиками.

Рисунок 5 – Наклонная цилиндрическая печь

Карусельная печь ScrapManager™ внешними формами почти напоминает наклонную цилиндрическую, однако вращается вокруг своей центральной оси. Данная печь впервые появилась на рынке в конце 1970 и за истекшее время претерпела многочисленные усовершенствования (рисунок 6).

Рисунок 6 – Наклонные печи карусельного типа ScrapManager™

Карусельная печь ScrapManager™ используется для переплавки отбракованных отливок, экструдированного скрапа, скрапа из использованных банок (UBC), а также алюминиевого шлака (дросса). Данный вид лома имеет относительно низкую плотность по отношению к площади поверхности. Поэтому материал должен расплавляться быстро, во избежание выгорания тонкого слоя материала.

Подходит для расплавки различных сплавов, что подразумевает частую смену металлов в печи и для переработки всевозможных видов лома/скрапа. Печь может работать на чистом и загрязненном ломе с использованием надлежащего оборудования для ограничения загрязнения окружающей среды. Печь применяется в качестве плавильной печи вторичного цикла, а также в качестве первичного агрегата для утилизации собственных отходов. Также применяется для утилизации автомобильных свинцово-щелочных батарей.

Сушильный под передней загрузки (рисунок 7) – печь с передней или фронтальной загрузкой представляет собой устройство, оснащенное дверкой по всей ширине печи для обеспечения полного доступа вовнутрь печи.

Загрузка производится автопогрузчиком или, что более распространено, при помощи специальной загрузочной машины. Преимуществом данного типа устройства принято считать возможность полной выгрузки печи при непрерывной работе, а также способность работы с максимально высокой производительностью. Слабым местом печи является то, что необходимо произвести несколько операций загрузки для полного ее заполнения по причине внутренней геометрии печи. Данная печь подходит крупным и средним производителям под различные спецификации выплавок.

Рисунок 7 – Плавильная печь передней (фронтальной) загрузки

Вертикальная загрузка (рисунок 8) – печь с верхней (вертикальной) загрузкой представляет собой устройство со съемной крышкой для обеспечения полного доступа вовнутрь печи. Загрузка производится с помощью козлового крана и загрузочного ковша. Преимущество данного типа модели составляет возможность ее полной загрузки за очень короткое время. Печь разработана с учетом ее полной выгрузки после каждого плавильного цикла, с возможностью легкой смены выплавок. Слабой

стороной данной печи является потеря ею тепла при демонтаже крышки, что требует особого контроля последовательности операций по загрузке и плавлению.

Данная модель хороша для крупных переработчиков алюминия, под большие объемы, для переработки самого разнообразного лома/скрапа.

Рисунок 8 – Плавильная печь вертикальной загрузки

Многокамерная плавильная печь (рисунок 9) представляет собой комплекс из различных камер, разработанных под специальные задачи по физическому изменению перерабатываемого лома. Загрузка камер производится разными способами, включая подачу через приемник, а также загрузку через основной портал.

Рисунок 9 – Многокамерная плавильная печь

Печь с подачей через приемник включает в себя внешний приемник для подачи загружаемого сырья. Стандартный набор перерабатываемых материалов включает в себя экструзионный скрап, стружку и обрезки, пакетированный лом, а также материал с невысокими параметрами веса и невысокую относительную плотность. Данный вид сырья требует быстрого погружения ниже уровня тигля во избежание окисления и потерь металла.

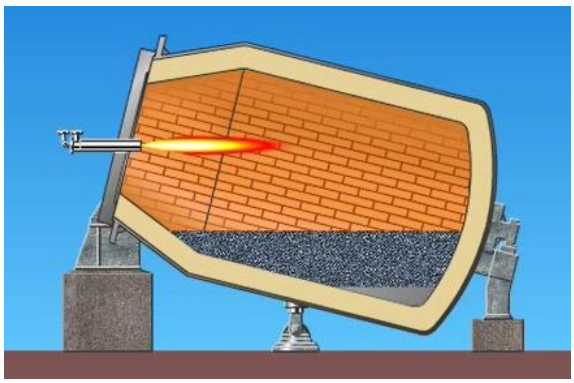
Данный тип печи рекомендован для использования в производстве ограниченного количества выплавок со стандартной рецептурой сплава. Сложность многопрофильного применения состоит в ограниченной возможности смены рецептуры в данной модели печи. Модель может представлять собой различную комбинацию камер, в зависимости от предполагаемого сырья и доступной площади для размещения печи.

Одним из высокотехнологичных решений по переработке вторичного алюминия является универсальная роторная наклонная печь (рисунок 10-11). Для нагрева печи и плавления металла используется кислородно-топливная горелка OXYFUEL. В позиции а рисунка 10 производится загрузка и плавление металла. В позиции б рисунка 10 производится слив металла

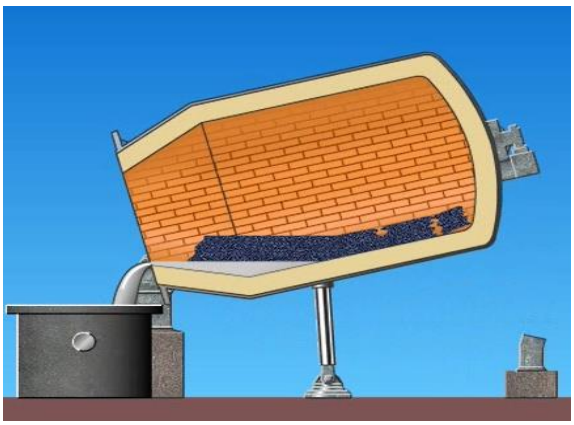
(наклон оси печи к горизонту ~ 30º). Отходы производства удаляются из печи при наклоне оси печи к горизонту ~ 45º (позиция б, рисунок 10). Универсальная роторная наклонная печь обладает существенным преимуществом перед традиционными роторными солевыми печами. Способность печи к наклону сокращает производственные циклы, экономя ценное время, которое обычно тратится на загрузку, выпуск алюминия и очистку. Для лучшего дожигания отходящих газов используемые кислородно-топливные горелки могут быть дополнены кислородными форсунками WASTOX®.

На основании многолетнего опыта эксплуатации данного оборудования можно выделить следующие преимущества его использования:

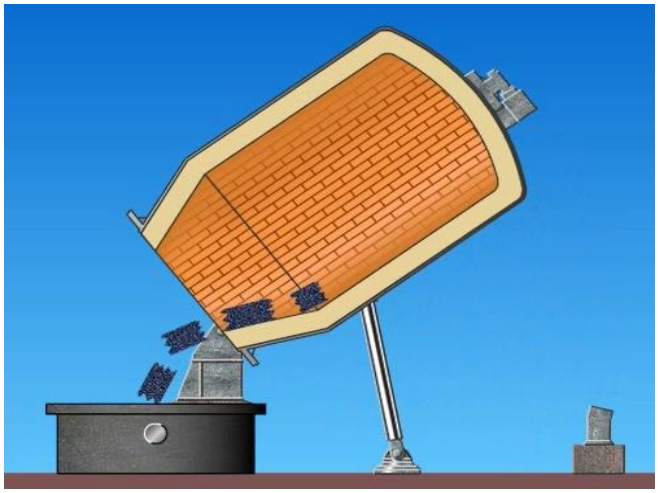
- высокий выход годного металла;
- высокая производительность;
- возможность использования загрязненого неметаллическими примесями дешевого сырья;
- снижение энергетических затрат;
- низкий уровень выбросов в окружающую среду;
- снижение затрат на утилизацию отходов.



а



б

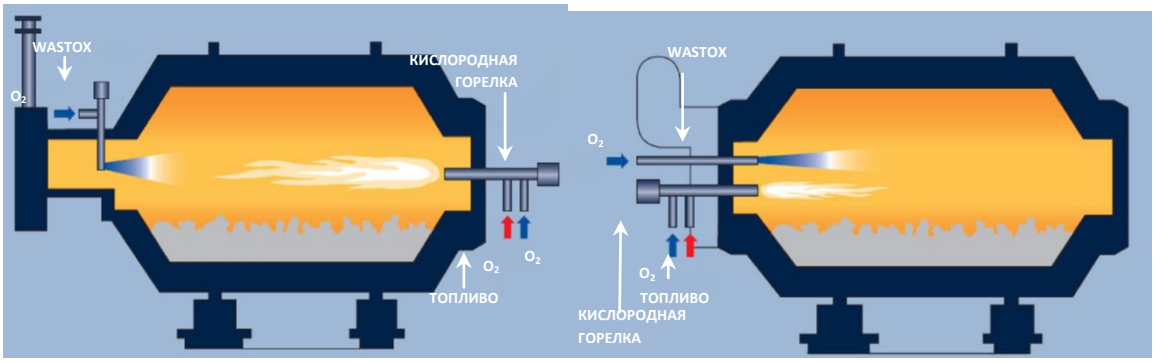


в

Рисунок 10 – Универсальная роторная наклонная печь: а – положение печи для загрузки и плавления металла; б - наклон печи для слива металла; в – наклон печи для удаления отходов производства

Рисунок 11 – Универсальная роторная наклонная печь на заводе StenaAluminiumAB, Швеция

Кислородная форсунка работает в тандеме с кислородной горелкой, обеспечивая полное дожигание отходящих газов и органических соединений в камере печи. Система WASTOX® не только удерживает уровни выбросов ниже требований нормативной документации, но и, дожигая нежелательные загрязняющие вещества, снижает эксплуатационные затраты на топливо. На рисунке 13 представлена схема возможного расположения кислородной форсунки WASTOX® совместно с кислородно-топливной горелкой OXYFUEL на примере коротко барабанной печи. Сравнивая производительность коротко барабанной печи при различном расположении кислородной форсунки и кислородно-топливной горелки (рисунок 13 а и б) можно заключить, что при расположении кислородной форсунки и кислородно-топливной горелки со стороны вытяжной вентиляции (рисунок 13 б) печь будет работать на 20% эффективнее. Это связано с увеличением времени нахождения продуктов сгорания в камере печи. Продукты сгорания в данном случае движутся по U-образной траектории, что приводит к лучшему переносу тепла и повышению производительности печи.



а б

Рисунок 13 – Принципиальная схема расположения кислородной форсунки WASTOX® и кислородно-топливной горелки OXYFUEL: а – горелка расположена со стороны загрузочной двери, б – горелка расположена со стороны вытяжной вентиляции (рекомендуется)

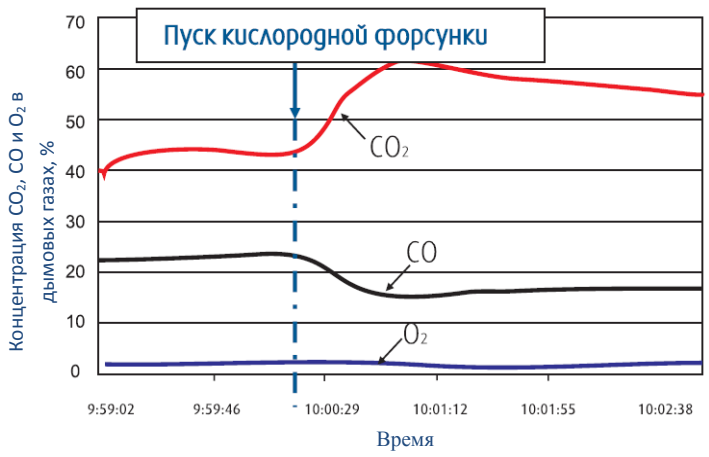


Рисунок 14 – Изменение концентрации CO_2, CO и O_2 в дымовых газах при пуске кислородной форсунки

На рисунке 14 представлено изменение концентрации CO_2, CO и O_2 в дымовых газах при пуске кислородной форсунки. Из рисунка 14 видно, что в печи происходит снижение концентрации CO без увеличения концентрации кислорода.

Следует отметить, что кислородно-топливные горелки OXYFUEL и систему WASTOX® возможно использовать во многих типах печей. Эти системы просты в установке, не требует высоких затрат при модернизации оборудования и на эксплуатационное обслуживание.

Индукционные МГД-устройства в подавляющем большинстве случаев конструируют на основе использования трехфазного переменного тока, так как при этом весьма простыми средствами можно создать так называемое бегущее магнитное поле, распределение которого во времени и пространстве представляет собой бегущую волну. При воздействии такой пространственно-временной волны на любое электропроводное тело возникает электродинамическая сила, стремящаяся увлечь тело в направлении движения поля.

Устройства, создающие бегущее поле, называют индукторами бегущего магнитного поля. Представление об индукторах бегущего магнитного поля можно получить, если мысленно разрезать статор обычного

асинхронного электродвигателя в одном месте вдоль образующей и развернуть в плоскость. При таком развертывании вращающееся поле статора преобразится в прямолинейно бегущее поле. На рисунке 15 показано устройство плоской линейной индукционной МГД-машины с бегущим полем [11, 22].

Индуктор МГД-насоса состоит из двух магнитопроводов, состоящих из шихтованной электротехнической стали. В пазах магнитопровода укладывается многофазная обмотка. Между магниоопроводами расположен канал с жидким металлом.

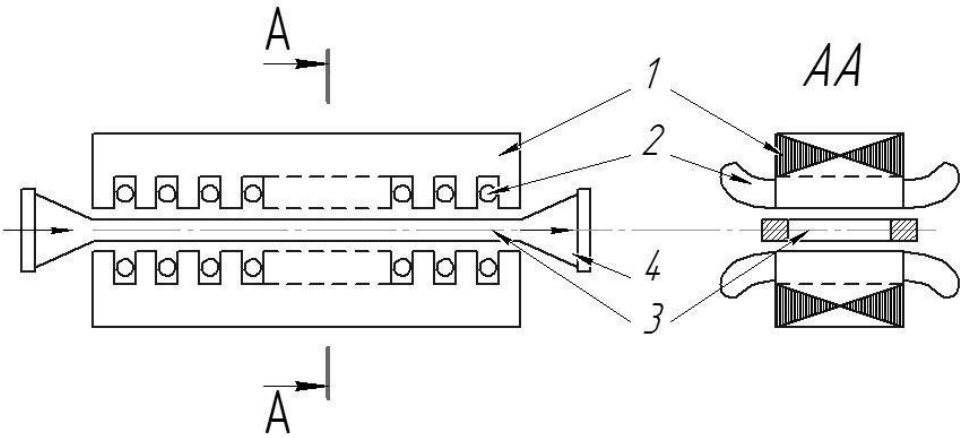


Рисунок 15 – Устройство плоской линейной индукционной МГД-машины:
1 – сердечник; 2 – многофазная обмотка; 3 – канал с металлом; 4 – устье канала
Обмотки на обоих сердечниках индуктора включаются согласно (чтобы линии поля пересекали канал)

В жидком металле индуцируются токи. Индуцированные токи взаимодействуют с магнитным полем, в результате чего в слоях металла возникают электромагнитные силы.

МГД-насос бегущего поля (рисунок 16), предназначенный для перекачивания жидких металлов (таких как жидкий магний и его сплавы, натрий, калий и подобные им металлы). Насос создает напор до 0.5 атмосферы и развивает максимальный расход до 7 тонн жидкого магния в час. Насос питается от трехфазной сети промышленной частоты. Канал

насоса, который при работе с жидким магнием разрушается и нуждается в периодической замене, чрезвычайно прост и дешев в изготовлении, а замена его осуществляется просто и быстро одним рабочим. Насос прост в управлении.

Рисунок 16 – МГД насос бегущего поля

На рисунке 17 показана напорно-расходная характеристика МГД насоса бегущего поля, данные получены на галлиевом контуре для разных значений электрического тока в одной фазе.

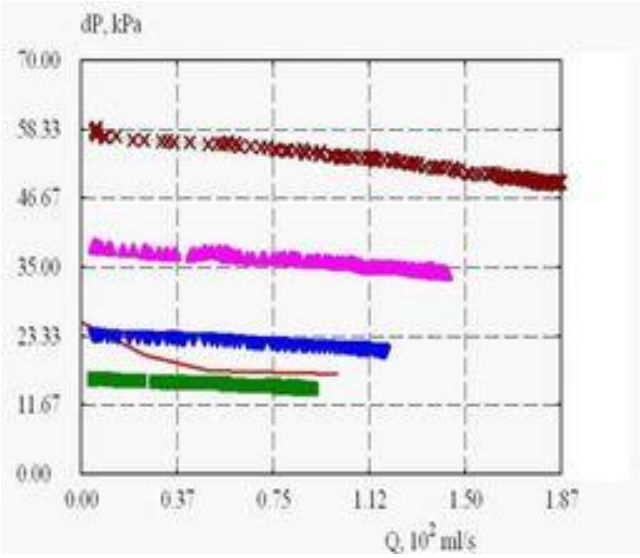


Рисунок 17 – Напорно-расходная характеристика МГД насоса

Магнитогидродинамический насос перекачивает металл при помощи специально создаваемых в жидком металле электромагнитных сил, поэтому не имеет подвижных частей, не вызывает перемешивания всего объема тигля и может перекачивать более чистый металл.

Рисунок 18 – Насос наружного расположения Пуш-Пул установлен на тигле перед литейным конвейером

Применение МГД насоса для подачи металла на конвейер разливки магниевых слитков позволяет перекачивать магний по трубам, тем самым снижая его окисление, и забирать металл более чистым из-под поверхности расплава. МГД насос не имеет движущихся частей, поэтому металл не загрязняется донными осадками. МГД насос позволяет удобно управлять процессом разлива слитков, максимально изолировать металл от внешней атмосферы и не допускать попадание в нее вредных газов, резко снижая риск профессиональных заболеваний.

Этот простой в обслуживании насос может использоваться для оперативных целей, когда насос приходится переносить из тигля в тигель, и он имеет длительные перерывы в работе. В отличие от насосов других конструкций, насос Пуш-Пул не нуждается в предварительном прогреве в соляном расплаве. Заборный патрубок этого насоса можно сразу опускать в жидкий магний.

Насос Пуш-Пул располагается выше уровня перекачиваемого металла и для его пуска требуется предварительный подсос жидкого металла в его канал. Электрический ток наводится трансформатором в канале насоса, поэтому работа его не зависит от окисных пленок внутри канала (как, например, у других кондукционных насосов), и большие перерывы в использовании не влияют на его работу.

Разработан МГД-перемешиватель для непрерывного литья цилиндрических слитков из алюминия и его сплавов., в котором вертикальные и горизонтальные течения в объеме возбуждаются соответственно бегущим и вращающимся магнитными полями с возможностью их раздельного регулирования.

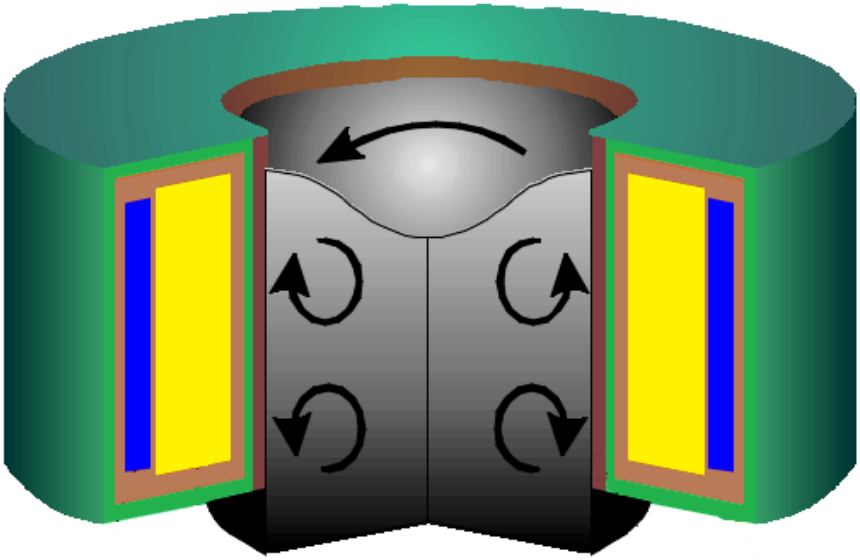


Рисунок 19 – МГД - перемешиватель

В МГД-перемешивателе вертикальные и горизонтальные течения в объеме возбуждаются соответственно бегущим и вращающимся магнитными полями с возможностью их раздельного регулирования.

В отличие от традиционного непрерывное литье с МГД-перемешиванием:

- улучшает кристаллическую структуру;
- равномерно распределяет примеси и легирующие добавки;
- повышает качество поверхности слитка.

МГД-перемешиватель по своим характеристикам превосходит существующие аналоги:

- осуществляет перемешивание металла в горизонтальной и вертикальной плоскостях с возможностью раздельного регулирования интенсивности этих движений, что позволяет управлять формой фронта кристаллизации и размером кристаллической структуры;
- перемешиватель влагозащищен и выдерживает попадание на корпус жидкого алюминия в аварийной ситуации.

1.1 Постановка задачи

В таблице 1 приведены исходные данные для математического моделирования.

1.2 Принцип действия заливочного кармана

1.3 Устройство заливочного кармана плавильной печи

Физическая модель для демонстрации и исследования явлений взаимодействия электромагнитного поля и жидкого металла (МГД процессов). Является уменьшенной копией промышленной установки. Заливочный карман состоит (рисунок 21): дуговой индуктор 1, жидкий металл 2 , канал 4, заливочного карман 3, емкости печи 5.

1.4 Выводы по разделу

Произведен обзор существующих плавильных печей и МГД устройств. Выявлены недостатки и преимущества металлургических устройств. Были выбраны исходные данные, описаны принцип действия заливочного кармана и его физическая модель.

2 Математическое моделирование

2.1 Математическая модель электромагнитных процессов

Первоначальным этапом математического моделирования электромагнитного вращения металла является выполнение электромагнитного расчета. Схема системы «расплав – МГДП», представленная на рисунке 23, состоит из расплава 1 и МГД вращателя, состоящего из катушек 2 и магнитопровода 3.

Выполнить предварительную оценку влияния движения металла на электромагнитное поле позволяет магнитное число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}_{\text{м}}=\mu_a \gamma v_0 l_0=13{,}5, \tag{1.1}$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость;

γ – удельная электрическая проводимость;

v_0 – характерная скорость;

l_0 – характерный размер.

Так как $Re_м>1$, необходимо учитывать влияние движения металла на электромагнитное поле.

Таким образом, для решения электромагнитной задачи, были приняты следующие допущения:

1. Электромагнитное поле в расчетной области изменяется по гармоническому закону;
2. Влияние движения металла на магнитное поле учитывается через скольжение.

Система уравнений, описывающих электромагнитное поле, записанная относительно векторного и скалярного потенциалов (1.2 и 1.3), и уравнение непрерывности (1.4) имеют вид:

$$\nabla^2\mathbf{A}-\nabla\left(\nabla\mathbf{A}+\varepsilon_a\mu_a\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right)-\varepsilon_a\mu_a\frac{\partial^2\mathbf{A}}{\partial t^2}=-\mu_a\boldsymbol{\delta}; \tag{1.2}$$

$$\nabla^2\varphi+\frac{\partial}{\partial t}\nabla\mathbf{A}=-\frac{\rho_q}{\varepsilon_a}; \tag{1.3}$$

$$\nabla\boldsymbol{\delta}=-\frac{\partial\rho_q}{\partial t}, \tag{1.4}$$

где **A** – векторный потенциал;

φ – скалярный потенциал неподвижных зарядов;

δ – вектор плотности тока;

ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

ρ_q – плотность свободных зарядов;

t – время.

Входящий в уравнения (1.2 и 1.4) вектор плотности тока имеет вид:

$$\boldsymbol{\delta}=\gamma\left(-\nabla\varphi-\frac{\delta\mathbf{A}}{\delta t}+\mathbf{v}\times(\nabla\times\mathbf{A})\right), \tag{1.5}$$

где **v** – вектор скорости.

Пренебрегая токами смещения, а также накладывая кулоновскую калибровку ($\nabla\mathbf{A}=0$) и учитывая отсутствие в расчетной области свободных электрических зарядов ($\rho_q=0$ и $\varphi=0$), уравнения (1.2 – 1.4) можно записать в следующем виде:

$$\nabla^2\mathbf{A}=-\mu_a\boldsymbol{\delta}; \tag{1.6}$$

$$\nabla\boldsymbol{\delta}=0. \tag{1.7}$$

При этом вектор плотности тока принимает следующий вид:

$$\boldsymbol{\delta}=\gamma\left(-\frac{\delta\mathbf{A}}{\delta t}+\mathbf{v}\times(\nabla\times\mathbf{A})\right). \tag{1.8}$$

Анализ электромагнитного поля в расчетной области сводится к решению системы уравнений (1.6 – 1.8) в 3D постановке относительно трех компонент векторного потенциала.

С учетом принятых допущений, уравнения можно записать в комплексном виде:

$$\nabla^2\dot{\mathbf{A}}=-\mu_a\dot{\boldsymbol{\delta}}; \tag{1.9}$$

$$\nabla\dot{\boldsymbol{\delta}}=0; \tag{1.10}$$

$$\dot{\boldsymbol{\delta}}=-\gamma j\omega\dot{\mathbf{A}}, \qquad (1.11)$$

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

Чтобы электромагнитное поле в расчетной области определялось однозначно, дополним систему уравнений (1.9 – 1.11) граничными условиями.

Считая, что расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ($\mu=\infty$), на границах расчетной области будут выполняться условия:

для касательной составляющей векторного потенциала:

$$\frac{\partial\dot{\mathbf{A}}_{\tau}}{\partial n}=0; \qquad (1.12)$$

для нормальной составляющей векторного потенциала:

$$\dot{\mathbf{A}}_{n}=0, \qquad (1.13)$$

где n – нормаль к поверхности расчетной области.

Для выполнения электромагнитного расчета исходными данными служат геометрические параметры, удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость расплава, катушек МГДВ, магнитопровода МГДВ, а также амплитуда и частота питающего индуктор тока.

При построении геометрии и расчетной сетки модели системы «расплав – МГДП» были выделены следующие области (рисунок 24): расплав 1, катушка 2, магнитопровод 3, вспомогательная расчетная область индуктора, расчетная область, область имитации бесконечности.

В расчетных областях сетка была более детализированная, чем в области имитации бесконечности. Область имитации бесконечности

использовалась для максимального исключения влияния граничных условий на решение задачи. При этом размер элементов в области бесконечности увеличивается по мере удаления от расчетной области.

Для решения электромагнитной задачи использовались элементы, предназначенные для расчета магнитного поля относительно векторного магнитного потенциала, записанного в кулоновской калибровке в 3D постановках соответственно.

Для учета взаимного влияния электромагнитных и гидродинамических полей было выполнено сопряжение соответствующих задач разработанной дополнительной внешней программой.

2.2 Математическая модель магнитогидродинамических процессов

Последующим этапом математического моделирования электромагнитного перемешивания металла является решение гидродинамической задачи на основании результатов, полученных при выполнении электромагнитного расчета. Термогидродинамический расчет выполняется в области расплава 1 с заданием требуемых граничных и начальных условий. Влияние электромагнитного поля учитывается введением в уравнения движения и энергии соответствующих источниковых членов, полученных при выполнении электромагнитного расчета.

Предварительную оценку характера термогидродинамических процессов, протекающих в жидком металле, находящемся в электромагнитном поле, можно выполнить через критерии подобия гидродинамики и магнитной гидродинамики.

Число Гартмана характеризует отношение электромагнитных сил к вязким:

$$\mathrm{Ha}=B_0\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}\,l_0=2{,}8\cdot10^5, \qquad (1.14)$$

где B_0 – магнитная индукция;

μ – динамическая вязкость.

Так как число Гартмана больше 1, электромагнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава.

Число Рейнольдса характеризует отношение инерционных сил к вязким:

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho v_0}{\mu} l_0=5\cdot 10^6, \tag{1.15}$$

где ρ – плотность.

Так как значение много более 10000, режим течений будет турбулентным, и требуется использование моделей турбулентности.

Как показали результаты исследований корректности термогидродинамических расчетов, на примере индукционной тигельной печи, модели турбулентности, основанные на Рейнольдсовом осреднении уравнений Навье-Стокса (RANS), не всегда дают корректные результаты распределения температур. Наиболее точные результаты, в этом случае, дают модели прямого численного моделирования турбулентности (DNS – Direct Numerical Simulation). Поскольку турбулентность исключительно пространственное явление, использование этих моделей возможно только при решении переходной задачи в 3D постановке. Использование полной DNS модели в инженерных расчетах нерационально, так как она требует разряжения даже самых мелких вихрей. В таких случаях применяют прямое численное моделирование с использованием подсеточного моделирования микромасштабной турбулентности (LES – Large Eddy Simulation).

Для решения гидродинамической задачи влиянием свободно конвективных течений на движение расплава пренебрегаем.

Система уравнений, описывающих гидродинамические процессы, состоит из уравнений сохранения массы (1.20) и движения (1.21):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho \mathbf{v})=s_{\rho}; \tag{1.16}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t}+\nabla(\rho \mathbf{v}\mathbf{v})=-\nabla p+\nabla \boldsymbol{\tau}+\rho \mathbf{g}+\mathbf{s}_{v}, \tag{1.17}$$

где s_p, $\mathbf{s}_v$ – источниковые члены уравнений сохранения массы, движения и энергии;

p – давление;

$\boldsymbol{\tau}$ – тензор вязких напряжений.

Жидкость можно рассматривать, как несжимаемую. В качестве источниковых членов уравнений движения, при решении задач магнитной гидродинамики, служит сила Лоренца $\mathbf{f}_{эм}$. С учетом выше сказанного система уравнений (1.16 – 1.17) принимает вид:

$$\nabla \mathbf{v}=0; \tag{1.18}$$

$$\frac{\partial \rho_0 \mathbf{v}}{\partial t}+\nabla\left(\rho_0 \mathbf{v}\mathbf{v}\right)=-\nabla p+\nabla \boldsymbol{\tau}+\mathbf{f}_{эм}; \tag{1.19}$$

Компоненты тензора вязких напряжений $\boldsymbol{\tau}$ определяются как:

$$\boldsymbol{\tau}_{ij}=\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial v_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right), \tag{1.20}$$

где v_i, v_j, v_k – компоненты вектора скорости;

δ_{ij} – символ Кронекера.

Поскольку на основании предварительной оценки характера течений следует ожидать турбулизации потоков, система уравнений (1.18 – 1.20) должна быть записана для турбулентного движения.

Полное прямое численное моделирование, в связи с высокими требованиями к вычислительным ресурсам при больших числах Рейнольдса, применяется в редких случаях. Более распространено прямое численное моделирование турбулентности с использованием подсеточного моделирования микромасштабной турбулентности (LES). Суть метода заключается в том, что крупные вихри рассчитываются явно, а более мелкие моделируются с использованием правил подсеточного замыкания (SGS – subgrid-scale). Исключение вихрей малого масштаба (менее размера элемента сетки), из исходной системы уравнений, выполняется применением процедуры фильтрации:

$$f=\bar{f}+f', \tag{1.21}$$

где $\bar{f}$ – фильтрованная, рассчитываемая явно часть величины f;

f' – подсеточного масштаба, моделируемая часть величины f.

В результате применения процедуры фильтрации к системе уравнений (1.18–1.20) в уравнении (1.20) появляется дополнительный (остаточный) член тензора вязких напряжений, называемый напряжением подсеточного масштаба:

$$\boldsymbol{\tau}_{ij}^{r}=\rho_0\left(\overline{\mathbf{vv}}-\overline{\mathbf{v'v'}}\right). \tag{1.22}$$

Этот член разделяется на изотропную и девиатропную части:

$$\boldsymbol{\tau}_{ij}^{r}=\boldsymbol{\tau}_{ij}^{r}-\frac{1}{3}\boldsymbol{\tau}_{kk}^{r}\delta_{ij}+\frac{1}{3}\boldsymbol{\tau}_{kk}^{r}\delta_{ij}. \tag{1.23}$$

Наиболее популярной LES моделью является модель Смагоринского–Лилли. В этой модели девиатропная часть подсеточных напряжений, подобно RANS моделям, моделируется, используя гипотезу Буссинеска:

$$\tau_{ij}^{r} - \frac{1}{3}\tau_{kk}^{r}\delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}. \qquad (1.24)$$

2.3 Результаты моделирования

Результаты математического моделирование приведены на рисунках 25, 26, 27, 28, 30.

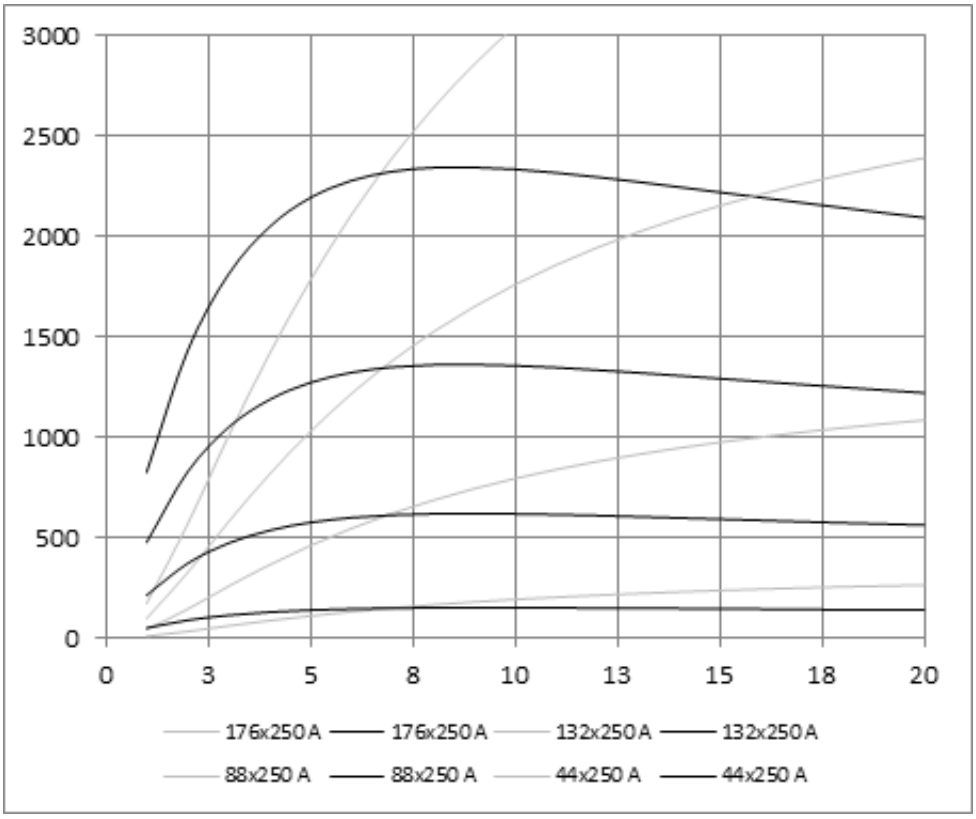


Рисунок 29 – Тангенциальная и нормальная составляющая силы от частоты при различных параметрах индуктора

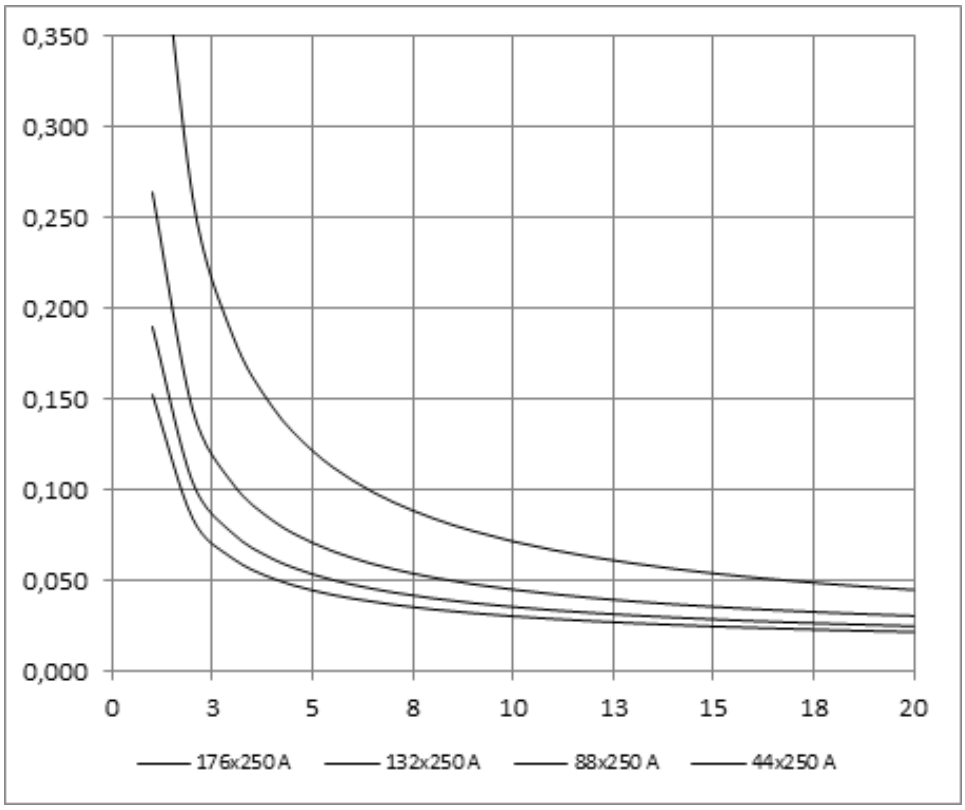


Рисунок 30 – Коэффициент мощности от частоты при различных параметрах индуктора

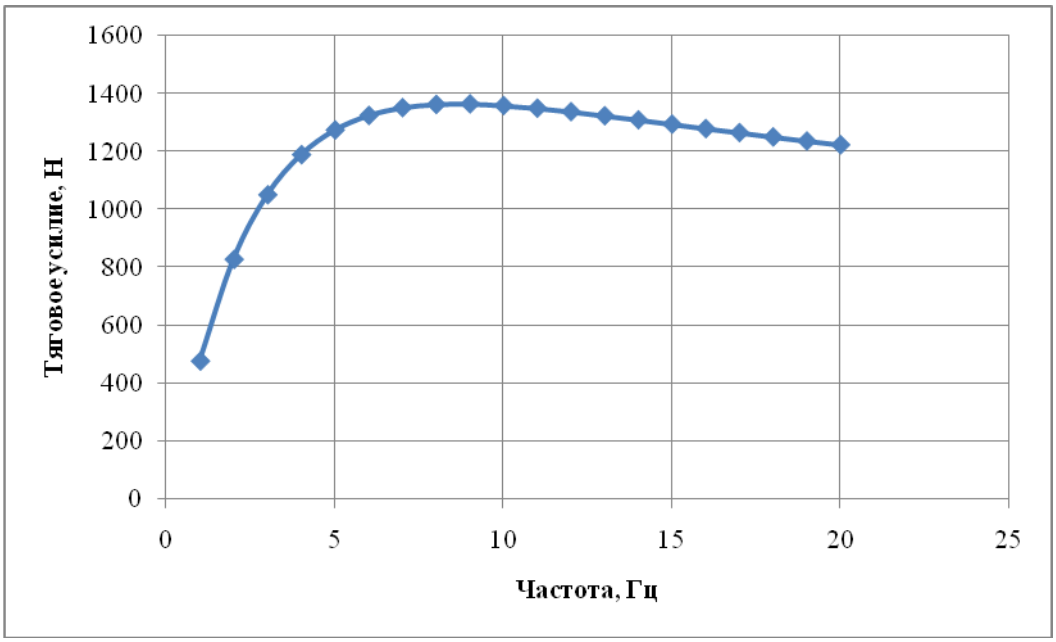


Рисунок 31 – Зависимость тягового усилия от частоты

По графику (рисунок 31) видно что при увеличении частоты возрастает и тяговое усилие, максимальное усилие достигается при частоте в диапазоне от 6 до 9 Гц.

По результатам математического моделирования были определены оптимальные параметры дугового индуктора, параметры представлены в таблице 2. По этим параметрам был сконструирован индуктор и проведены измерения.

2.4 Выводы по разделу

Произведены электромагнитные и магнитогидродинамические расчеты в среде Ansys, по полученным результатам были выбраны оптимальные параметры дугового индуктора.

3 Экспериментальные исследования индуктора

Измерения проводились без рабочего тела. Питание индуктора осуществлялось через транзисторный преобразователь частоты в диапазоне частота 0,5–20 Гц и от трехфазного лабораторного автотрансформатора при частоте 50 Гц. Активное сопротивление индуктора 0,04 Ом.

Таблица 3 - Результаты измерения 1 при Iуст=80 А (ПЧ)

f, Гц	**Uф, В**	**I1, А**	**I2, А**	**I3, А**
0,5	37	80	80	80
1	43	80	80	80
2	56	80	80	80
3	75	80	80	80
4	94	80	80	80
5	114	80	80	80
10	201	77	76	79
15	204	54	53	55
20	205	42	41	43

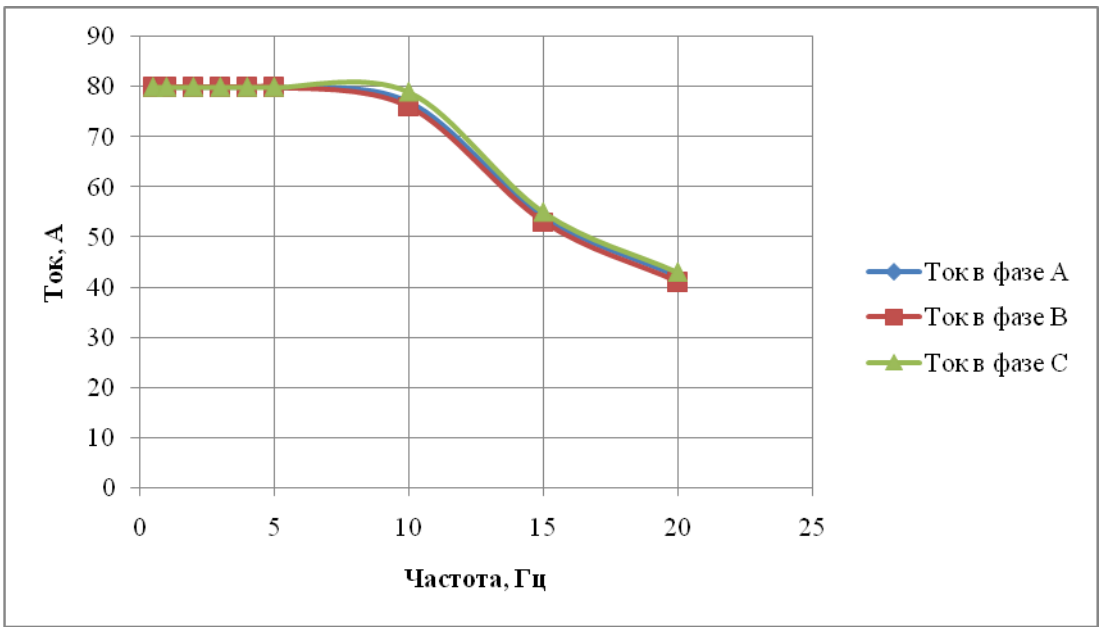


Рисунок 32 – Зависимость токов в фазах индуктора от частоты первого измерения

По графику (рисунок 32) первого измерения видно что при низких частотах ток во всех фазах индуктора одинаковый, начиная с 6 Гц ток во всех фазах падает.

Таблица 4 - Результаты измерения 2 при Iуст=250 А (ПЧ)

f, Гц	Uф, В	I1, А	I2, А	I3, А
0,5	118	250	250	249
1	133	250	250	249
2	165	250	250	250
3	186	236	235	240
4	196	187	186	191
5	198	150	148	153
10	202	78	77	79
15	204	53	53	55
20	204	42	41	43

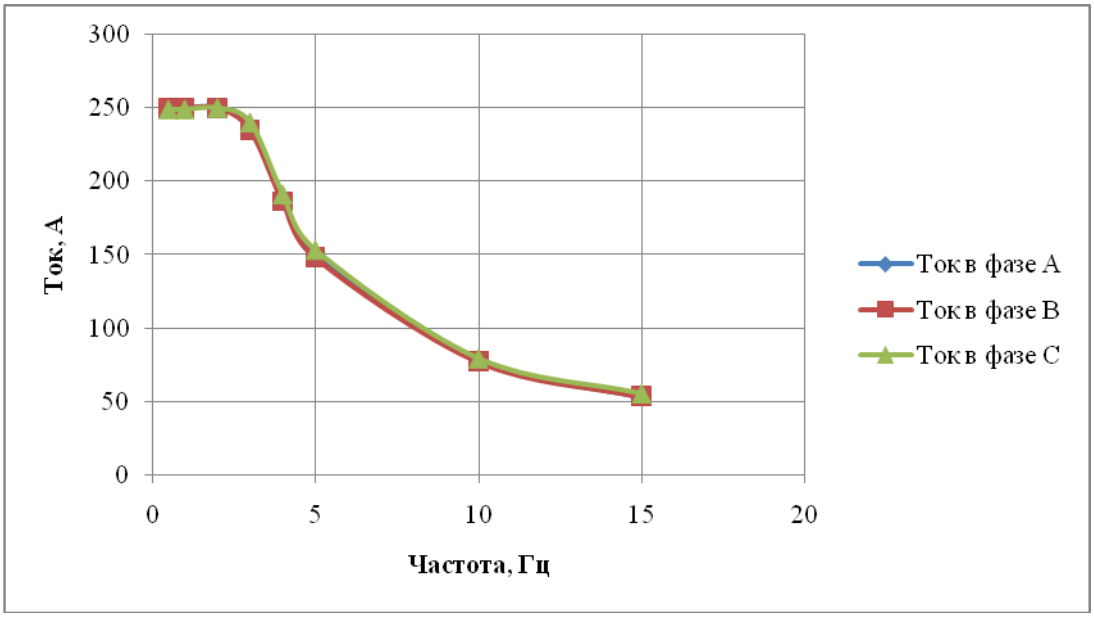


Рисунок 33 – Зависимость токов в фазах индуктора от частоты второго измерения

По графику (рисунок 33) второго измерения видно что при низких частотах ток во всех фазах индуктора одинаковый, но падать начинает раньше чем при первом опыте, так как напряжение больше, по таблицам 3 и 5 видно что токи начинают падать примерно при 180 В.

Таблица 5 - Результаты измерения 3 при f=3 Гц (ПЧ)

Uф, В	**I1, А**	**I2, А**	**I3, А**
35	25	25	25
51	50	50	50
90	100	100	100
134	150	150	150
166	200	200	200
185	239	237	242

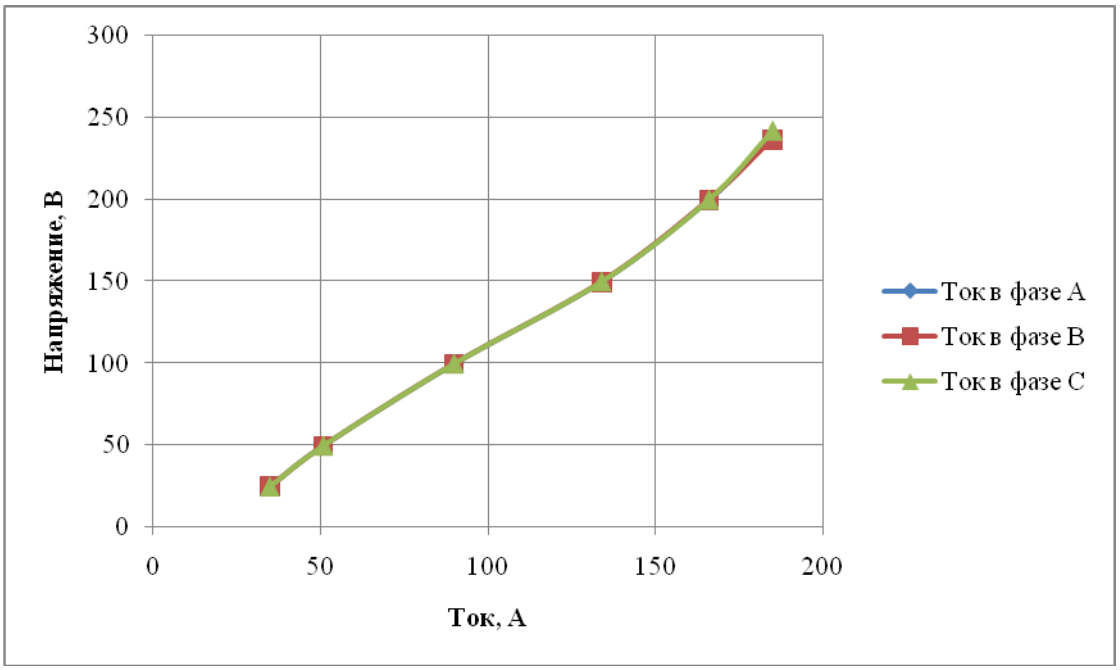


Рисунок 34 – Вольт амперная характеристика третьего измерения

По графику (рисунок 34) видно, что при частоте 3 Гц при повышение напряжения ток во всех фазах возрастает.

Таблица 6 - Результаты измерения 4 при f=5Гц (ПЧ)

Uф, В	**I1, А**	**I2, А**	**I3, А**
46	25	25	25
74	50	50	50
107	75	75	75
140	100	100	100
170	125	125	125
195	147	145	149

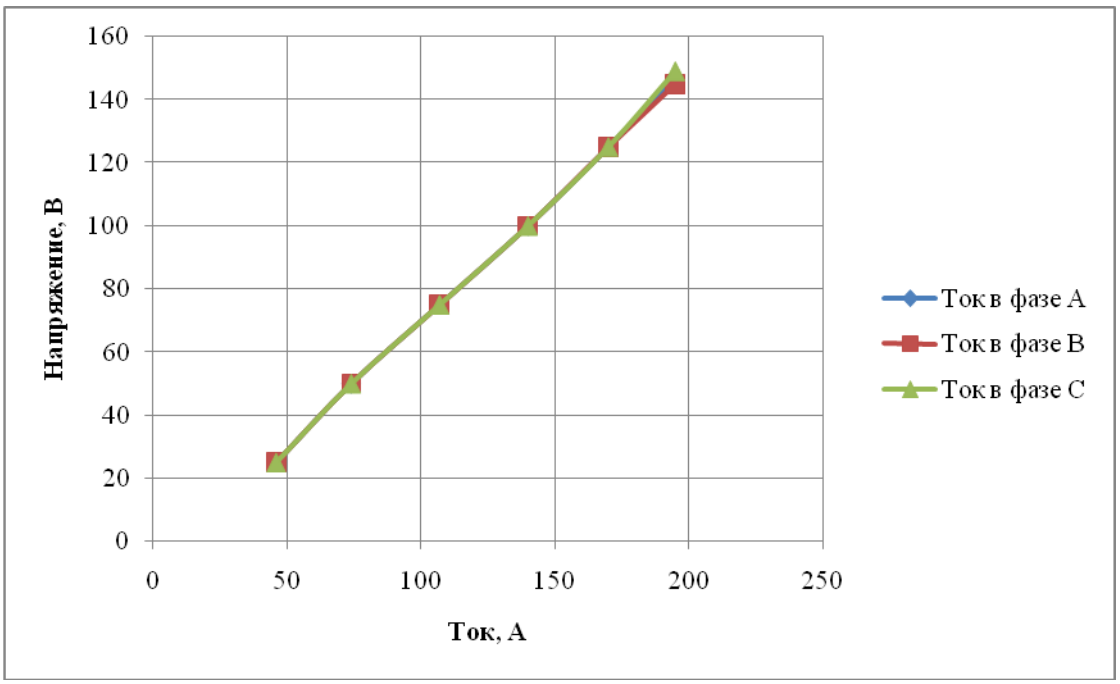


Рисунок 35 – Вольт амперная характеристика четвертого измерения

По графику (рисунок 35) видно, что при частоте 5 Гц так же как и при 3 Гц ток в фазах возрастает, но при 5 Гц величина тока при увеличение напряжения меньше, чем при 3 Гц.

Таблица 7 - Результаты измерения 5 при f=10Гц (ПЧ)

Uф, В	**I1, А**	**I2, А**	**I3, А**
203	78	77	79
184	70	70	70
136	50	50	50
71	25	25	25

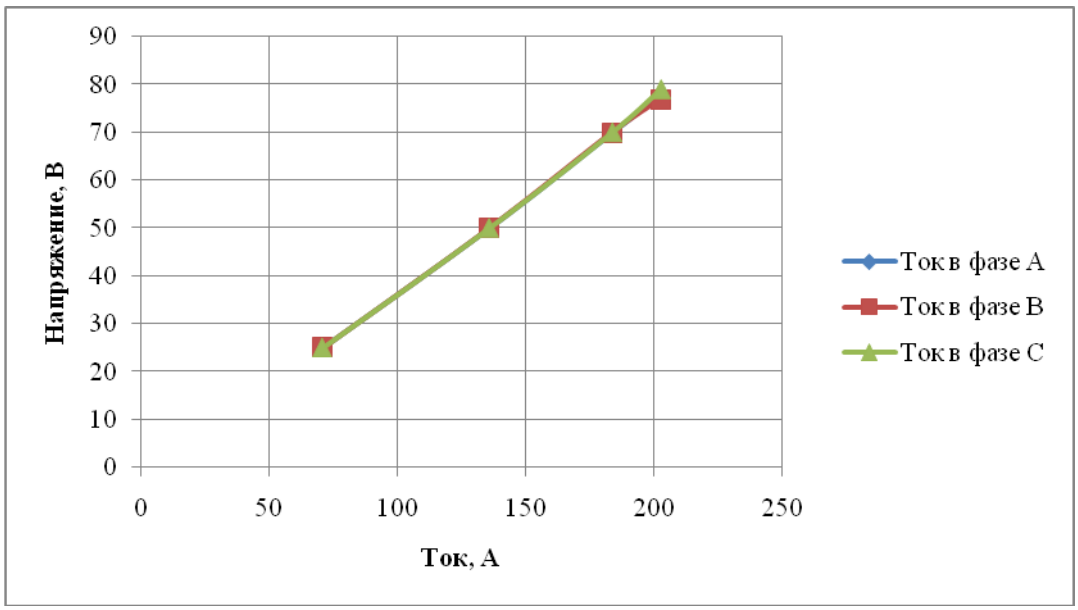


Рисунок 36 – Вольт-амперная характеристика пятого измерения

По графику (рисунок 36) видно, что при частоте 10 Гц ток меньше чем при первых пяти измерениях.

Таблица 8 - Результаты измерения 6 при f=50 Гц (ЛАТР)

Uab, В	Ubc, В	Uac, В	Ia, А	Ib, А	Ic, А
50	53	57	3,3	3,5	2,8
92	98	90	6,3	6,3	5,2
140	141	139	9,8	9,4	7,8
184	187	184	13	12,3	10,4
232	234	232	16	15,2	13,3
282	284	282	19,3	18,5	16,4
340	342	340	23,5	22,1	19,8
388	387	385	27,4	25,1	22

По таблице 8 видно, что при 50 Гц ток намного меньше, чем при том же напряжении что и при первых пяти измерений.

Таблица 9 - Расчет параметров индуктора на основе измерений

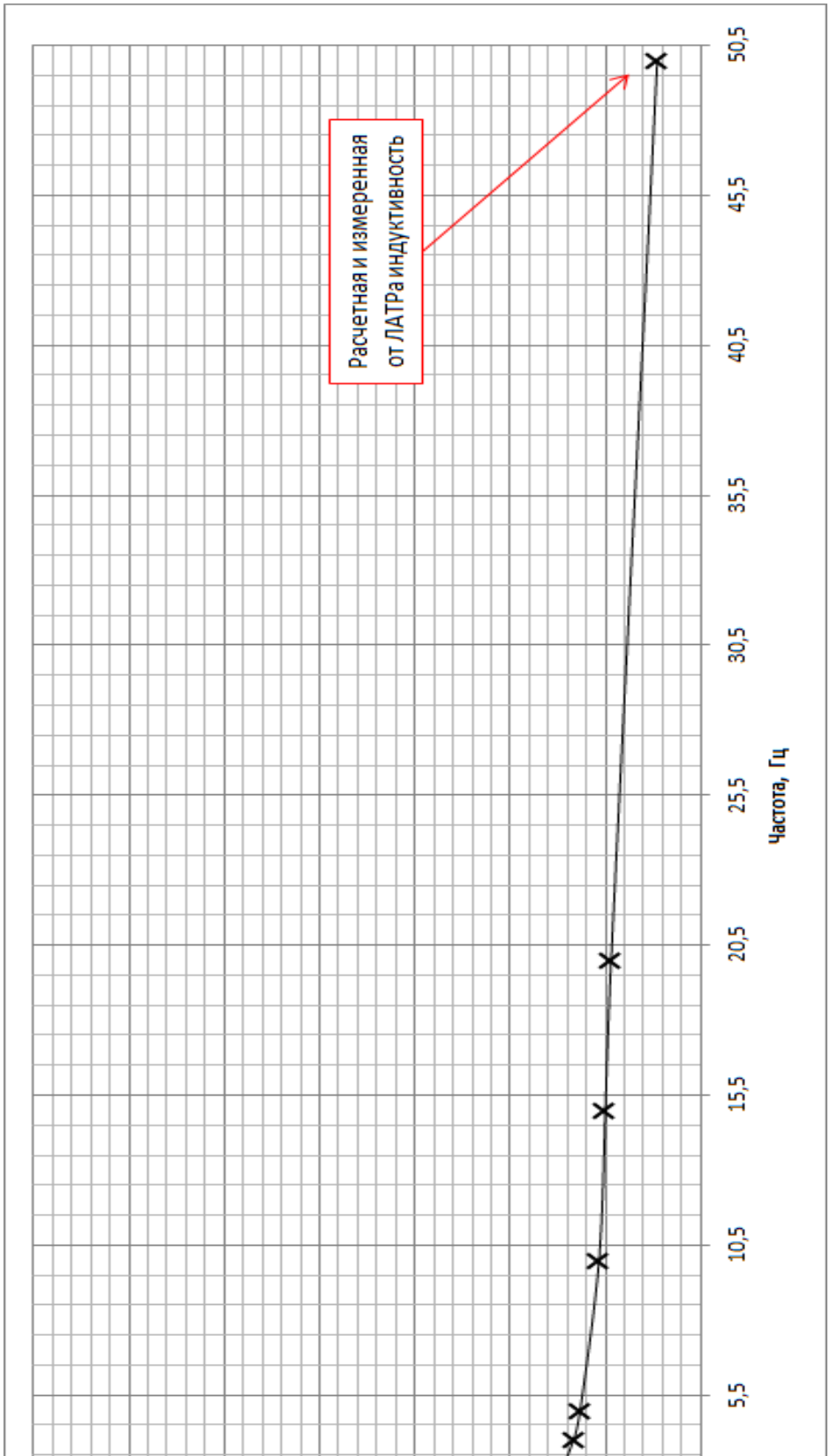


Рисунок 37 – Зависимость индуктивности от частоты

3.1 Выводы по разделу

В данном разделе были произведены экспериментальные исследования на физической установке. Были произведены несколько измерений при разных частотах и источников питания. По результатам всех измерений можно сделать вывод, что оптимальной частотой индуктора является 6 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен обзор и анализ существующих устройств, выявлены их преимущества и недостатки. Проведен предварительный анализ физических процессов и подтверждено предположение о формировании воронки в цилиндрическом кармане. Создана математическая и физическая модель заливочного кармана с МГД вращателем расплава. Произведены экспериментальные исследования. Определены оптимальные параметры индуктора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ruscastings [корпоративный сайт]. URL: http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2132/5517.html (дата обращения: 25.11.2015).

2. Pyrotek [корпоративный сайт]. URL: http://www.pyrotek.info/documents/datasheets/899_-_LOTUSS_-_R4.pdf (дата обращения: 19.11.2015).

3. DebraEquip [корпоративный сайт]. URL: http://debraequipment.com/product/electromagnetic-liquid-metal-pump-for-aluminum/electromagnetic-liquid-metal-pump-for-aluminum.html (дата обращения: 28.12.2015).

4. Хацаюк, М. Ю. Индукционная установка с МГД воздействием в процессе приготовления и разливки высоколегированных алюминиевых сплавов: Диссертация / М. Ю. Хацаюк - 2013. - 154 с.

5. Ruscastings [корпоративный сайт]. URL: http://www.ruscastings.ru/work/168/2130/2132/5220 (дата обращения: 18.03.2016).

6. Бычков, А. В. Индукционное устройство в МГД технологиях / А. В. Бычков, Б. А. Сокунов, С. Ф. Сарапулов и др. // Вопросы совершенствования

электро-технологического оборудования и электротехнологий: сборник статей. - Екатеринбург, УГТУ-УПИ. - 2000. - № 8. - С. 4-17.
7. Wikipedia [интернет-энциклопедия]. URL: https://ru.wikipedia.org (дата обращения: 25.11.2015).
8. Metalspase [корпоративный сайт]. URL: http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/metallurgiya-alyuminiya/684-pechi-pereplavka-alyuminievogo-loma.html (дата обращения: 28.04.2016).
9. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения: Учебное пособие / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шмычак. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. 236 с.
10. Верте Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1975. 288 с.
11. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия,1970. 272 с.
12. Вольдек, А. И. Электрические машины: Учебн. для вузов / А. И. Вольдек. - Л.: Энергия. - 1974. - 840 с.
13. Вольдек, А. И. Об электромагнитных явлениях в индукционных насосах с разомкнутыммагнитопроводом / А. И. Вольдек // Электромеханика. - 1962. - № 8. – С. 82-96.
14. Смирнов, Е. М. Метод конечных объёмов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е. М. Смирнов, Д. К. Зайцев // - Научно-технические ведомости. - 2004. - № 2. С. 70-81.
15. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. - М.: Высшая школа. - 1964. - 730 с.
16. Копылов И.П., Беляев Е.Ф. Математическое моделирование линейных асинхронных двигателей // Известия вузов. 1977. N1. С.11-20.
17. Сарапулов Ф.Н., Сидоров О.Ю. / Магнитогидродинамические машины с бегущим или пульсирующим магнитным полем. Методы расчета: Учебное пособие / Екатеринбург: УГТУ, 1994. 206 с.

18. Разработка программных средств для математического моделирования МГД-установок // Вопросы совершенствования электротехнического оборудования и электротехнологий: Сборник статей / Ф.Н.Сарапулов, С.Ф.Сарапулов, О.Ю.Сидоров, Б.А.Сокунов.. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2000. № 8. 290 с.
19. Тимофеев, В.Н.Исследование, разработка и внедрение МГД-технологий в плавильно-литейное производство алюминиевых сплавов / В.Н.Тимофеев, Н.П. Маракушин, М.Ю.Хацаюк, А.С. Темеров И.С. Гудков // Сборникнаучных трудов международной конференции “Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий «АПЭЭТ-2014»”. – 2014. – С. 106
20. Тимофеев, В.Н. Электромагнитные вращатели, перемешиватели и дозаторы алюминиевых расплавов: дис. д-ра техн. наук. – Красноярск, 1994. − 210 с.
21. Doležel, I. Advanced adaptive algorithms in 2d finite element method of higher order of accuracy / I. Doležel, P. Karban, F. Mach, B. Ulrych // Source of the DocumentStudies in Computational Intelligence. – 2013. –№ 483 – P. 293.
22. Полищук, В.П. Магнитогидродинамические насосы для жидких металлов / В.П. Полищук, М.Р. Цин, Р.К. Горн. − Киев : Наук. Думка, 1989. −256с.