

На правах рукописи



Болотин Кирилл Евгеньевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДУКЦИОННЫХ
МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МАШИН МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО
НАЗНАЧЕНИЯ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Фризен Василий Эдуардович

Официальные оппоненты: **Рубцов Виктор Петрович,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», г. Москва, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий»;

Тиунов Василий Васильевич,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, профессор кафедры «Электротехника и электромеханика»

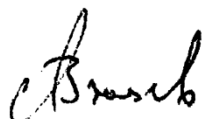
Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «20» июня 2018_ г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=278276>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зюзев Анатолий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Интенсивное внедрение магнитогидродинамических (МГД) технологий в металлургию пришлось на конец 50-х годов. Это стало результатом предыдущих исследований, которые показали преимущество МГД технологий над классическими механическими способами воздействия на расплавленный металл. Отсутствие прямого контакта с расплавом, легкая управляемость, малая инерционность и экономичность позволяли применять их практически в любых технологических процессах.

На начальном этапе внедрения МГД установок в металлургическое производство, они имели значительное преимущество над всеми старыми способами воздействия на расплав. Но со временем, рост требований к количеству, качеству и стоимости конечной продукции привел к необходимости поиска способов повышения эффективности уже существующих систем или необходимости разработки новых типов установок.

На протяжении следующих 60 лет в этих направлениях было проведено множество научно-исследовательских работ. Наибольший вклад в них внесли: М.Г. Резин, Л.А. Верте, И.М. Кирко, А.Б. Капуста, З.Н. Гецелев, М.В. Огороков, В.Н. Тимофеев, Ф.Н. Сарапулов, Р.М. Христинич, М.В. Первухин, С.Ф. Сарапулов и др. Среди зарубежных ученых широко известны работы А. Jakovics, V. Vojarevics, S. Luri, E. Baake, B. Nacke и др.

Одним из основных ограничителей роста эффективности уже существующих систем можно назвать большую величину рабочего зазора между верхней плоскостью индуктора и нижней плоскостью расплава. Его наличие связано с необходимостью использования огнеупорной футеровки большой толщины для защиты индуктора МГД установки от температурного воздействия со стороны расплава. Вместе с этим, снижается эффективность воздействия на жидкий металл электромагнитного поля, индуцируемого МГД установкой.

Можно сказать, что большая часть исследовательских работ была направлена на компенсацию рабочего зазора непрямым или прямым способом. К первым можно отнести разработку системы управления, определение наиболее эффективных параметров источника питания, разработка новых конструкций индукторов и т.д. Ко вторым: внедрение водоохлаждаемых зубцов в футеровку, врезку в футеровку специального водоохлаждаемого гнезда для размещения в нем индуктора и т.д. Отдельно стоит выделить не электромеханический, но важный для дальнейших рассуждений метод создания новых футеровочных масс, применение которых позволит уменьшить толщину огнеупорной кладки с сохранением степени влияния температуры на индуктор.

Несмотря на определенные успехи в этих направлениях, они имеют ряд недостатков, таких, как: увеличение токовой нагрузки на обмотки индуктора, что приводит к значительным затратам меди и железа на его производство; увеличение механических напряжений и градиентов температуры в огнеупорной кладке; значительным тратам на разработку и производство новых огнеупорных масс, что приводит к увеличению затрат на обслуживание емкостей и каналов для

расплава. Применение этих решений в комплексе так же не является выходом из сложившейся ситуации, поскольку происходит суммирование как положительных, так и отрицательных эффектов.

Таким образом, поиск новых решений по повышению эффективности индукционных магнитогидродинамических машин металлургического назначения имеет большую актуальность.

Исходя из вышесказанного, наиболее выгодным является применение такого метода, при котором толщина футеровки остается прежней, но уменьшается рабочий или немагнитный зазор в зависимости от конструкции машины, что позволит увеличить значение индукции магнитного поля в металле, на который оказывается электродинамическое воздействие. Вместе с этим, не должно произойти значительных изменений в механической и термической прочности футеровки.

Данный метод может быть реализован за счет продления зубцов магнитопровода индуктора вставками из специального композитного материала, сочетающего в себе огнеупорные, диэлектрические и магнитные свойства. Применение такого высокотемпературного магнитодиэлектрического (ВМД) композита позволит повысить эффективность индукционных магнитогидродинамических машин металлургического назначения.

Объект исследования: индукционный магнитогидродинамический перемешиватель расплавленного металла, в конструкции которого применены вставки из ВМД композита.

Предмет исследования: электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы в индукционных МГД перемешивателях, в конструкции которых применены вставки из ВМД композита.

Цель работы: повышение эффективности работы МГД перемешивателя за счет использования в его конструкции вставок из ВМД композита.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих конструкций МГД перемешивателей и способов повышения их эффективности.
2. Исследование тепловых, электрических и магнитных свойств высокотемпературного магнитодиэлектрического композита.
3. Создание верифицированной компьютерной модели МГД перемешивателя, предназначенной для исследования электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов протекающих в нем.
4. Исследование рационального соотношения размеров вставок из ВМД композита для определения конструкции индуктора МГД перемешивателя миксера емкостью 40 тонн.
5. Обоснование выбора формы вставок для индуктора с целью максимально эффективного перемешивания на максимально возможной высоте вставок.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Рассмотрена и обоснована необходимость применения ВМД композита для повышения эффективности работы МГД перемешивателей.

2. Определены наиболее выгодные соотношения размеров и формы вставок из ВМД композита для индуктора МГД перемешивателя.

Теоретическая значимость работы, заключается в следующем: создана и верифицирована компьютерная модель, описывающая связанные электромагнитные, гидродинамические и теплообменные процессы в МГД перемешивателе алюминия с вращающимся электромагнитным полем с донным расположением индуктора.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны рекомендации по созданию промышленного образца МГД перемешивателя, в конструкции которого использованы вставки из ВМД композита.

2. Определено рациональное соотношение размеров и формы вставок из ВМД композита для конструкции индуктора МГД перемешивателя миксера объемом 40 тонн.

Методология и методы исследования: использованы общеизвестные законы электромагнетизма, магнитной гидродинамики и тепломассообмена; методы измерения электрофизических, магнитных, теплофизических и механических свойств; методы компьютерного моделирования связанных электромагнитных, гидродинамических и теплообменных задач в конечноэлементном пакете COMSOL Multiphysics; физический эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

1. Верифицированная компьютерная модель электромагнитных и теплогидродинамических процессов протекающих в расплаве, на который воздействует подовый МГД перемешиватель.

2. Результаты измерения электрофизических, теплофизических и механических свойств разных составов высокотемпературного магнитодиэлектрического композита.

3. Результаты исследования эффективности применения вставок из ВМД композита в конструкции металлургических МГД перемешивателей.

4. Результаты исследования влияния формы вставок из ВМД композита на эффективность работы металлургических МГД перемешивателей.

Достоверность результатов подтверждена использованием апробированного компьютерного пакета COMSOL Multiphysics; использованием поверенных измерительных приборов; сравнением экспериментальных и теоретических результатов исследования; сравнением с результатами, полученными другими авторами.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. МАШИНОСТРОЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА.", Екатеринбург, Россия, 8-11 июля, 2015 г.

2. 19th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA 2016), Burgas, Republic of Bulgaria, 29 May – 01 June, 2016.

3. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2017 ElConRus), St. Petersburg, Russia, February 1–3, 2017.

4. VIII International Scientific Colloquium Modelling for Materials Processing (MMP 2017), Riga, Latvia, September 21–22, 2017.

5. Международная конференция «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий, АПЭЭТ-2017», Екатеринбург, Россия, 2017 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 11 научных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в журналах, включенных в базу Web of Science, и 6 материалов конференций, индексируемых в базах Scopus и РИНЦ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 104 библиографических ссылок. Текст работы изложен на 110 страницах, содержит 72 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной проблемы решаемой в диссертационной работе, определены объект и предмет исследования, сформулированы его цель и задачи, выделена научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы и описана используемая методология, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверность полученных результатов.

В первой главе проведен обзор литературных источников посвященных магнитогидродинамическому воздействию на расплав в процессе его приготовления. Описаны и структурированы наиболее часто используемые конструкции МГД установок для перемешивания расплава, выделены их основные достоинства и недостатки.

Рассмотрены современные способы повышения эффективности МГД установок для перемешивания расплава. Исходя из анализа литературных источников, был сделан вывод о недостаточной проработке темы компенсации рабочего зазора, связанной с тем, что это требует вмешательства в огнеупорную футеровку металлургической установки. Было предложено увеличивать длину зубцов магнитопровода за счет внедрения в футеровку вставок из композиционного материала, обладающего магнитными, диэлектрическими и огнеупорными свойствами. Формулируется цель и обосновываются задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке, созданию и исследованию электрических, магнитных, механических и тепловых свойств образцов высокотемпературных магнитодиэлектрических (ВД) композиционных материалов.

На основе проведенного обзора литературных источников, посвященных магнитомягким материалам, используемым в электротехнике, был сделан вывод о необходимости использования магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа и огнеупорного бетона. Методом прессования с последующим отжигом были созданы образцы двух составов, с массовой долей железа 50% и 70%.

Проведено исследование электромагнитных, механических и теплофизических свойств созданных образцов.

После анализа полученных результатов для дальнейших исследований был выбран ВМД композит с составом 70% железа 30% бетона, его физические параметры приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Физические параметры ВМД композита 70:30

Параметр	Значение
Средняя электропроводность, См/м	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Относительная магнитная проницаемость	9,4
Среднее значение пористости, %	50,96
Среднее значение кажущейся плотности, г/см ³	2,97
Среднее значение прочности, кгс/см ²	305,9
Средняя теплоемкость, Дж/кг·К	704
Средняя теплопроводность, Вт/м·К	51

Третья глава посвящена созданию и верификации компьютерной модели лабораторного подового МГД перемешивателя расплавленного алюминия.

Наличие такой модели позволяет проводить исследования возможности модернизации аналогичных промышленных МГД перемешивателей с помощью ВМД композита, без значительных экономических и временных затрат. Все компьютерное моделирование выполнялось в пакете COMSOL Multiphysics.

В лаборатории кафедры ЭЭС есть торцевой МГД перемешиватель с вращающимся электромагнитным полем, разработанный и созданный в ходе предыдущих исследовательских проектов научного коллектива кафедры. Данная установка была выбрана в качестве экспериментального стенда для верификации компьютерной модели, но на первом этапе необходимо разработать и создать эту модель.

Трехмерная геометрическая модель данного лабораторного МГД перемешивателя с вращающим полем была построена в САД системе Компас-3D (Рисунок 1).

Поскольку процессы протекающие в установке имеют сложный характер, для первичной оценки можно ввести критерии, которые позволят понять, какие допущения могут быть сделаны и какие параметры будут необходимы для получения достоверного решения без чрезмерных затрат вычислительных ресурсов. В качестве таких критериев выступают числа подобия, результаты расчетов и соответствующие выводы приведены в Таблице 2.

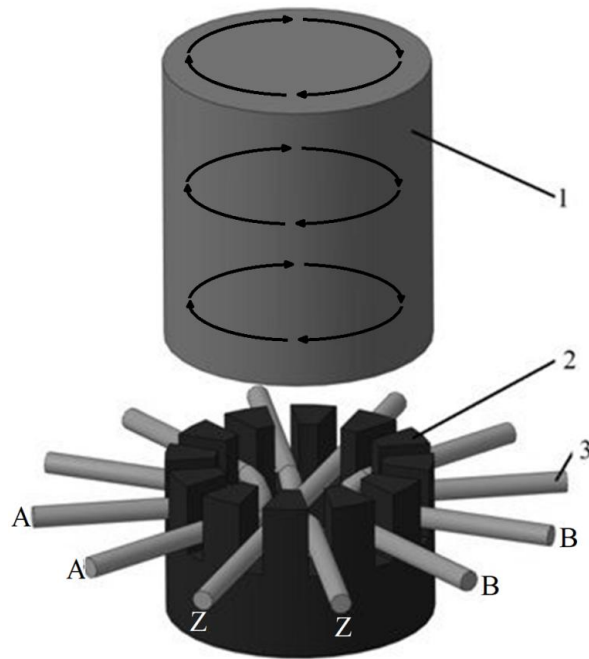


Рисунок 1 – Геометрическая модель лабораторного МГД перемешивателя (воздух скрыт): 1 – расплавленный металл, 2 – магнитопровод, 3 – катушки

На основе полученных результатов был сделан вывод, что задачу исследования взаимосвязанных электромагнитного и гидродинамического полей следует сформулировать, как решение взаимосвязанных нестационарной теплогидродинамической и квазистационарной электромагнитной задач без динамического обновления начальных условий по электромагнитным усилиям.

Таблица 2 – Результаты вычисления и анализа чисел подобия

Наименование	Обозначение	Значение	Вывод
Число Рейнольдса	Re	$3 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4$	Турбулентное течение
Магнитное число Рейнольдса	Re_{mag}	0,1	Магнитное поле расплава не влияет на поле индуктора
Параметр МГД-взаимодействия	N	10	Электромагнитные силы превосходят инерционные силы
Число Гартмана	Ha	200	Электромагнитные силы значительно превосходят вязкие силы
Число Рэлея	Ra	285	Свободноконвективные течения в расплаве отсутствуют.

При решении электромагнитной задачи были сделаны следующие допущения:

1. параметры всех областей не зависят от изменения температуры;
2. плотность тока в обмотке равномерна по сечению;
3. магнитопровод задается цельной геометрической фигурой;

4. поле усилий, индуцированных в металле, квазистационарно;
5. магнитное поле движущегося расплава не влияет на поле индуктора.

На Рисунке 2 представлена сетка модели для электромагнитной задачи, параметром, определяющим степень дискретизации, является величина глубины проникновения поля в расплавленный металл. Размер конечного элемента должен быть меньше ее значения.

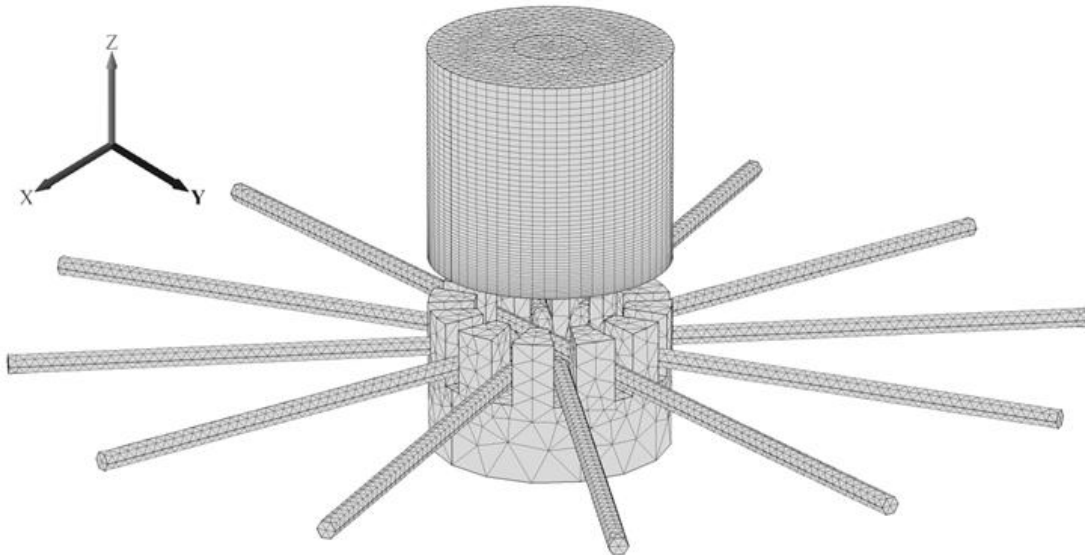


Рисунок 2 – Общий вид построенной сетки. 650000 элементов (102000 элементов в области расплавленного металла)

При решении гидродинамической задачи были сделаны следующие допущения:

1. физические свойства не зависят от изменения температуры;
2. сила тяжести влияет на массообменные процессы;
3. не учитывается образование свободной поверхности;
4. количества вещества в расчетной области не изменяется.

Поскольку гидродинамическая задача решается только в области расплавленного металла, специально для нее была построена дополнительная сетка, содержащая 290000 элементов. В качестве модели турбулентности была выбрана $k-\omega$ SST модель. Следующие допущения были сделаны при решении задачи теплообмена:

1. свободная конвекция отсутствует;
2. градиент температуры задан вдоль вертикальной оси, в горизонтальной плоскости на каждом уровне температура одинаковая;
3. фазовые переходы в жидком металле не происходят;
4. тепловые потери через излучение с поверхности металла не учитываются.

Для задач гидродинамики и теплопередачи используется одна и та же расчетная сетка.

Для оценки достоверности описанной компьютерной модели, было проведено сравнение результатов, полученных в ходе проведенного компьютерного моделирования и экспериментального исследования. Для этого

была использована лабораторная установка, ранее разработанная и созданная научным коллективом кафедры ЭЭТС.

Для оценки эффективности перемешивания был выбран способ исследования времени выравнивания температуры металла. Для его реализации была подготовлена следующая система для измерений, в стенке тигля были просверлены 3 отверстия на расстоянии 42, 57 и 72 мм от его дна. В отверстия были вставлены трубки из нержавеющей стали, диаметром 2 мм, углубленные на 10 мм внутрь тигля, с внешней стороны, она выступает на 50 мм.

Внутри трубки помещена термопара типа хромель-алюмель, термоспаем в закрытом конце, свободное пространство внутри заполнено минеральной изоляцией. Все эти приготовления позволяют производить измерения при температуре до 800°C , не опасаясь, что термопара будет повреждена. Все термопары подключены к четырехканальному модулю измерений NI-9211, измерения производятся с частотой 15 выборок в секунду, полученные значения записываются в отдельный файл для последующей обработки.

На Рисунке 3 приведен график зависимости показаний термопар и вычисленных значений температуры в аналогичных точках компьютерной модели от времени перемешивания.

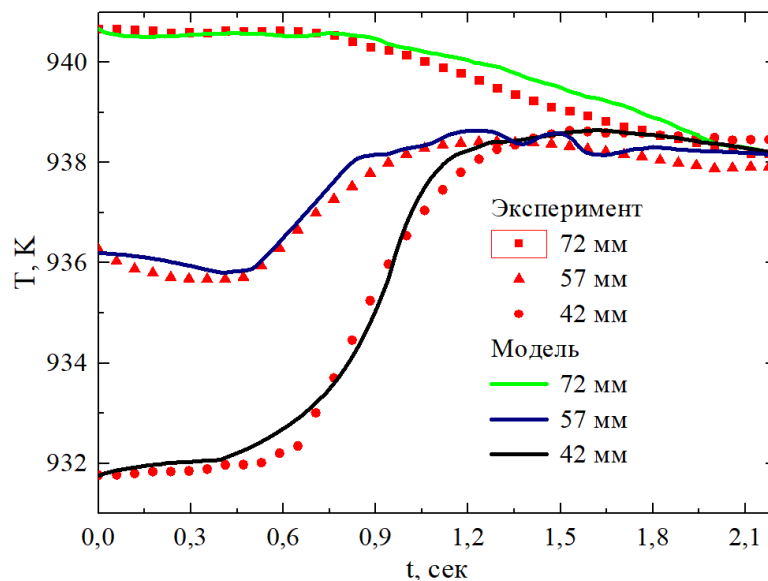


Рисунок 3 – Зависимость изменения температуры в расплаве от времени перемешивания

Как видно из графика, экспериментальные значения для всех трех точек хорошо коррелируют с результатами численного моделирования, а имеющиеся отклонения можно объяснить допущениями, сделанными в компьютерной модели, и погрешностью при измерениях. Исходя из этого, разработанную компьютерную модель можно считать достаточно достоверной и пригодной для проведения исследований.

В четвертой главе представлены результаты численного исследования эффективности применения вставок из ВМД композита в промышленном МГД перемешивателе алюминиевых расплавов для миксера объемом 40 тонн. Его геометрическая модель приведена на Рисунке 4.

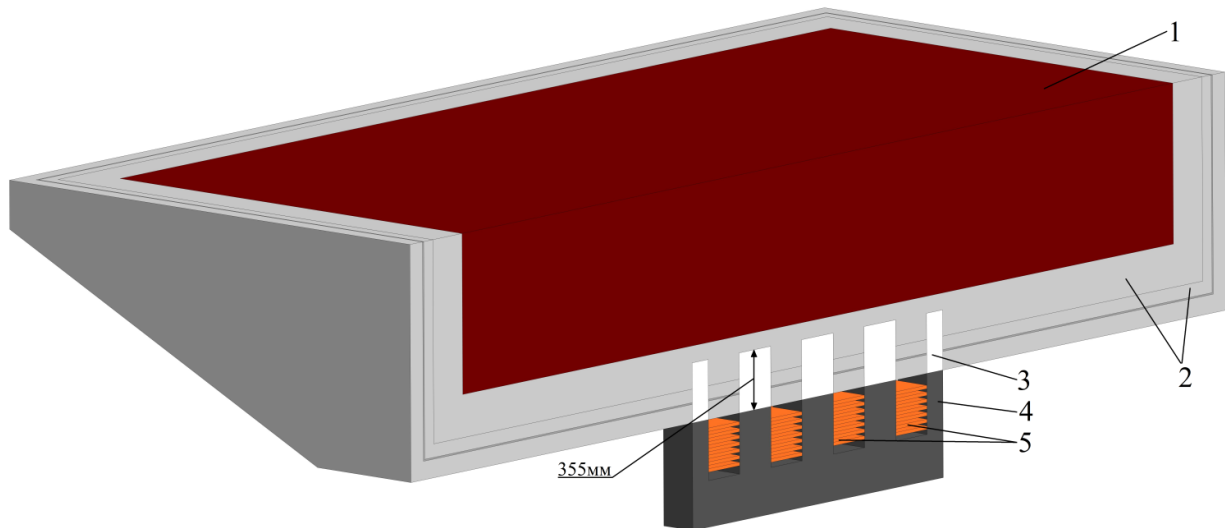


Рисунок 4 – Исследуемая трехмерная модель (воздух скрыт):
 1 – расплав, 2– огнеупорная футеровка, 3 – вставки из ВМД композита,
 4 – магнитопровод, 5 – обмотки

Было проведено сравнение результатов компьютерного моделирования для не модернизированной (высота вставок $L=0$ мм, величина рабочего зазора $H=455$ мм) и модернизированной (высота вставок $L=355$ мм, величина рабочего зазора $H=455$ мм) установок.

Кроме этого, в отдельных случаях проводилось сравнение с результатами моделирования базовой промышленной установки, в конструкции которой используется специальное немагнитное гнездо для компенсации рабочего зазора. Данное техническое решение было описано в патенте 2155918 «Гнездо для установки индуктора электромагнитного перемешивания на миксерах или печах», базовая конструкция установки (без использования вставок), была описана в диссертационной работе «Магнитогидродинамический перемешиватель алюминиевых расплавов в миксере сопротивления» Е.А. Павлова.

На первом шаге было проведено моделирование и анализ электромагнитных процессов в расплаве. Поскольку магнитное число Рейнольдса $Re_m=4,5$ для данной задачи значительно больше единицы, следует учитывать влияние поля индуцируемого движением расплава на поле МГД перемешивателя. В связи с этим, необходимо рассматривать силу Лоренца не только в пусковой момент ($S=1$), но и при установившемся течении расплава. Поэтому, для обоих случаев, тангенциальная F_t и нормальная F_n составляющие силы Лоренца были проинтегрированы по объему расплава для более детальной оценки изменения их влияния на жидкий металл в зависимости от высоты используемых вставок из ВМД композита. Результаты интегрирования приведены на Рисунке 5.

Анализ полученных результатов позволяет определить минимальную высоту вставок, равную $L=200$ мм, при которой нормальная и тангенциальная составляющие силы Лоренца не превышают значения, полученные для базовой конструкции перемешивателя.

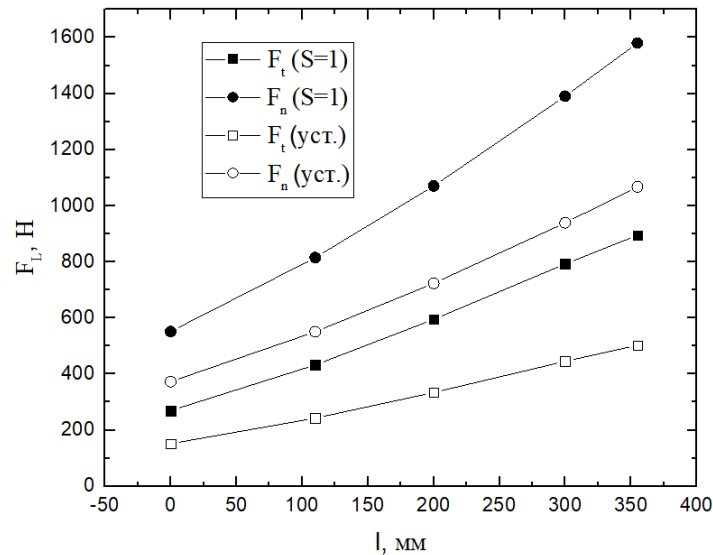


Рисунок 5 – График зависимости интегральных сил в расплаве от высоты вставок из ВМД композита

На втором шаге было проведено моделирование и анализ термогидродинамических процессов в системе «Вставки – футеровка – расплав».

На Рисунке 6 приведен график зависимости максимального значения скорости в объеме расплава от времени перемешивания. Его анализ позволяет сделать вывод, что установившееся состояние в расплаве никогда не достигается, поскольку всегда присутствуют колебания скорости относительно её усредненного значения ($V \approx 1,65$ м/с).

На Рисунке 7 представлены результаты определения усредненной скорости для установок с разной величиной вставок из ВМД композита. При высоте вставок больше 200 мм усредненная скорость перемешивания превосходит значение, полученное для базового перемешивателя. Таким образом, можно говорить о сохранении эффективности для вставок минимального размера.

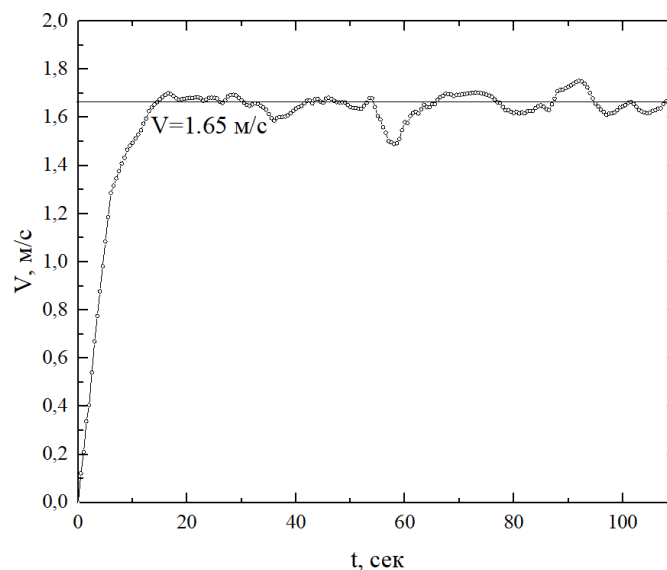


Рисунок 6 – График зависимости максимального значения скорости от времени перемешивания для установки, в конструкции которой применены вставки высотой 355 мм

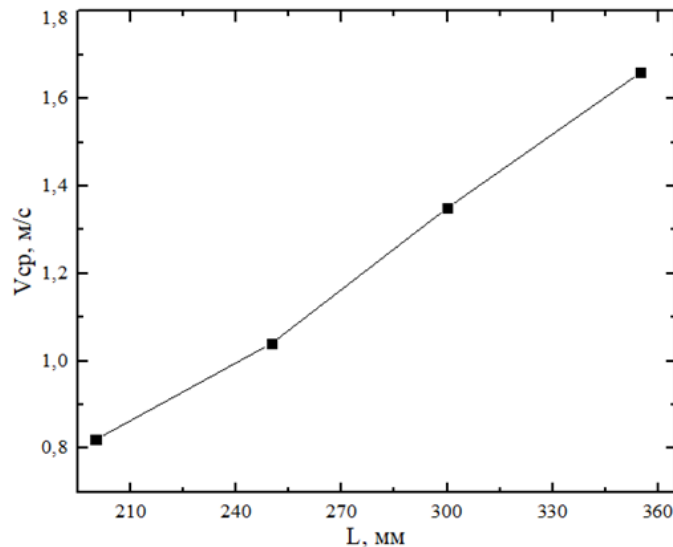


Рисунок 7 – Зависимость усредненного значения скорости в расплаве для разных значений высоты вставок из ВМД композита

Поскольку максимальная скорость перемешивания не означает максимальную эффективность перемешивания, в качестве оценочного параметра было предложено использовать время выравнивания температуры в объеме расплава. На Рисунке 8 приведён график зависимости изменения минимального и максимального значения температуры в объеме расплава от времени для установок с разной высотой вставок применяемых в их конструкции.

При $L=355$ мм время выравнивания температуры по всему объему составляет $t \approx 91$ секунд, самое длительное выравнивание происходит при $L=200$ мм, что логично следует из предыдущих результатов.

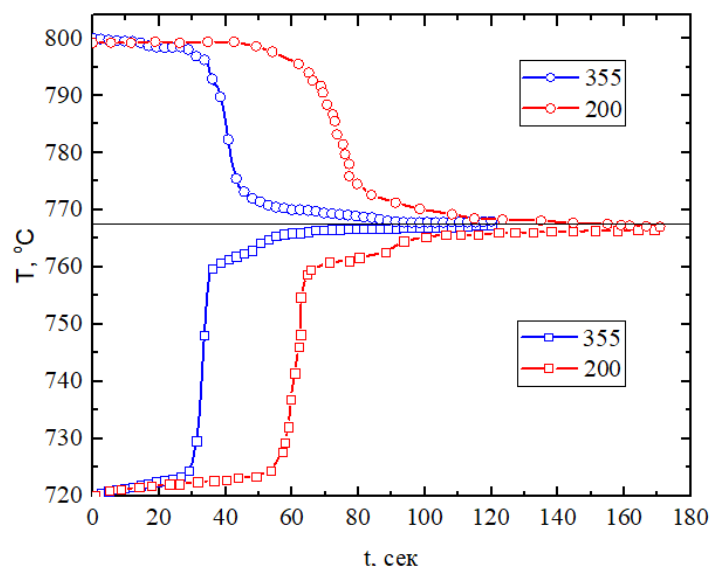


Рисунок 8 – График зависимости изменения максимального и минимального значения температуры от времени перемешивания для установок с разной величиной вставок из ВМД композита

Еще одним оценочным параметром может выступать время растворения лигатуры в потоке расплава. Данный параметр напрямую зависит от скорости

движения расплава в месте её закладки: $V_{\text{под}}$ – средняя скорость на подине ванны и $V_{\text{вых}}$ – средняя скорость на выходе индуктора. На основе компьютерного моделирования и аналитических расчетов, для базового промышленного образца Е.А. Павловым была получена зависимость, представленная на Рисунке 9. Используя этот график и определив значения этих скоростей для модернизированных установок с разной высотой вставок, можно будет оценить время размытия кремния и сделать вывод об эффективности их работы. Зависимость полученных значений скоростей от высоты вставок представлена на Рисунке 10.

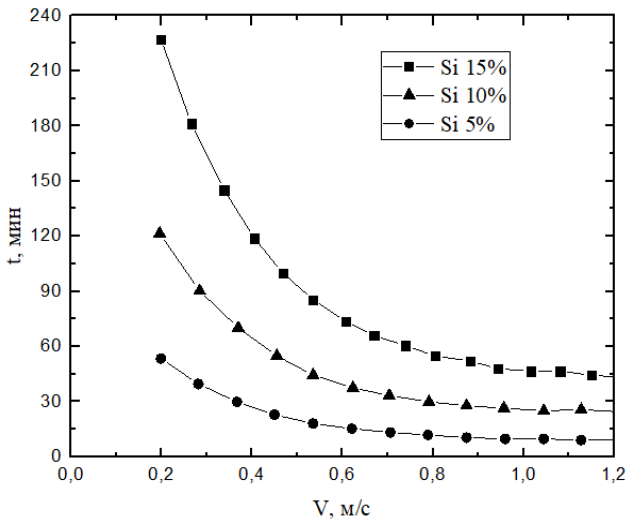


Рисунок 9 – Зависимость времени растворения кремния от скорости омывания

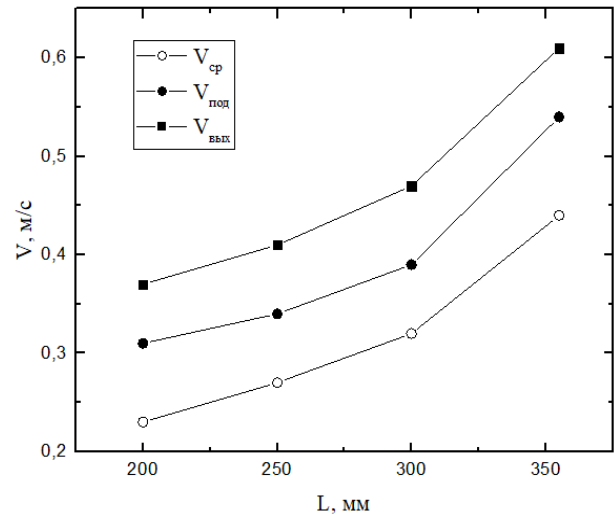


Рисунок 10 – Зависимость $V_{\text{ср}}$, $V_{\text{под}}$ и $V_{\text{вых}}$ от высоты вставок из ВМД композита

Анализ результатов показывает, что при загрузке лигатуры на дно ванны, для получения содержания кремния в расплаве 15%, понадобится время t_p от $t_p \approx 163$ мин ($V_{\text{под}} \approx 0,29$ м/с) для $L=200$ мм и до $t_p \approx 80$ мин ($V_{\text{под}} \approx 0,54$ м/с) для $L=355$ мм. При загрузке в край ванны соответственно от $t_p \approx 134$ мин ($V_{\text{вых}} \approx 0,36$ м/с) для $L=200$ мм и до $t_p \approx 75$ мин ($V_{\text{вых}} \approx 0,62$ м/с) для $L=355$ мм.

Для подтверждения эффективности применения вставок из ВМД композита в промышленных МГД установках, необходимо также оценить влияние их размещения в футеровке миксера и на распределение температурного поля в её объёме.

На Рисунке 10 приведена зависимость максимальной и минимальной установившейся температуры вставок от их высоты. Максимальная величина температуры не превышает значения температуры Кюри для ВМД композита в не зависимости от высоты вставок. Исходя из требований, предъявленных к промышленному образцу установки, температура внешней поверхности футеровки не должна превышать $T_{\text{внеш}}=60^\circ\text{C}$, с учетом этого ограничения, максимальное значение высоты вставок составляет $L_{\text{макс}}=232$ мм.

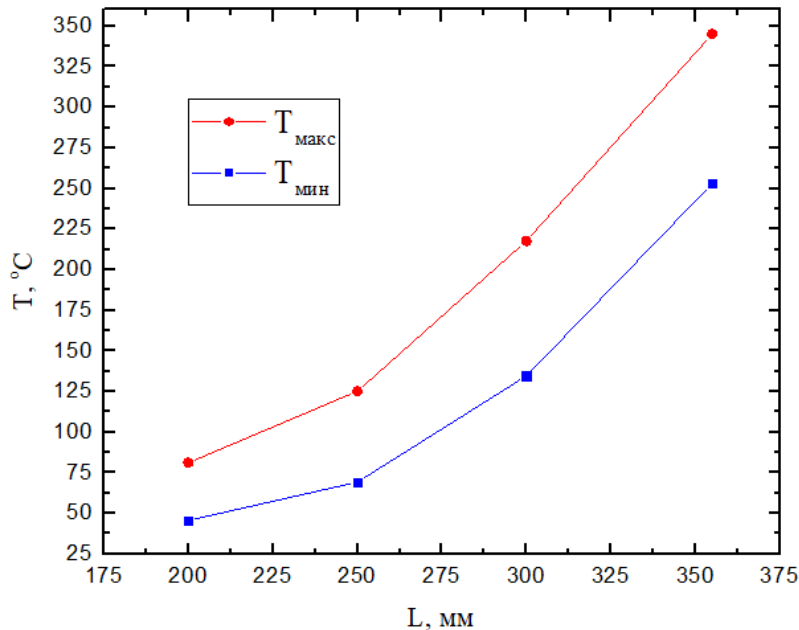


Рисунок 11 – График зависимости максимальной и минимальной температуры вставок от их высоты

ВМД композит обладает уникальным сочетанием диэлектрических, магнитных и теплофизических свойств, которое позволяет использовать его в качестве материала вставок, эффективность применения которых была показана в предыдущих разделах. Но кроме этого сочетания, он обладает еще одним достоинством, в отличие от магнитопроводов, изготовленных из электротехнической стали, вставки из ВМД композита могут быть отлиты практически в любой форме. Данная особенность открывает широкий простор для исследований по повышению эффективности работы МГД перемешивателей, в конструкции которых уже применяются вставки простой геометрической формы.

В качестве исследуемой установки был выбран ранее рассмотренный модернизированный перемешиватель для миксера емкостью 40 тонн, в конструкции которого есть вставки высотой $L=232$ мм. На Рисунке 12 представлены чертежи вставок нестандартной формы. Для большего удобства, форма вставок зависела от угла раствора наклонных плоскостей.

В качестве первого оценочного критерия была выбрана величина тангенциальной компоненты интегральной силы Лоренца в расплаве. На Рисунке 13 изображены графики зависимости тангенциальной компоненты интегральной силы Лоренца от угла наклона боковых сторон вставок α . Линия обозначает величину силы Лоренца для модернизированного МГД перемешивателя со вставками высотой $L=232$ мм. Как можно видеть, наибольшей эффективностью обладают обратно трапецевидные вставки, расширяющиеся вдоль оси Y, с углом раствора сторон $\alpha=145^\circ$. Их применение позволяет получить усилие на 20% больше чем у обычных вставок ($\alpha=90^\circ$).

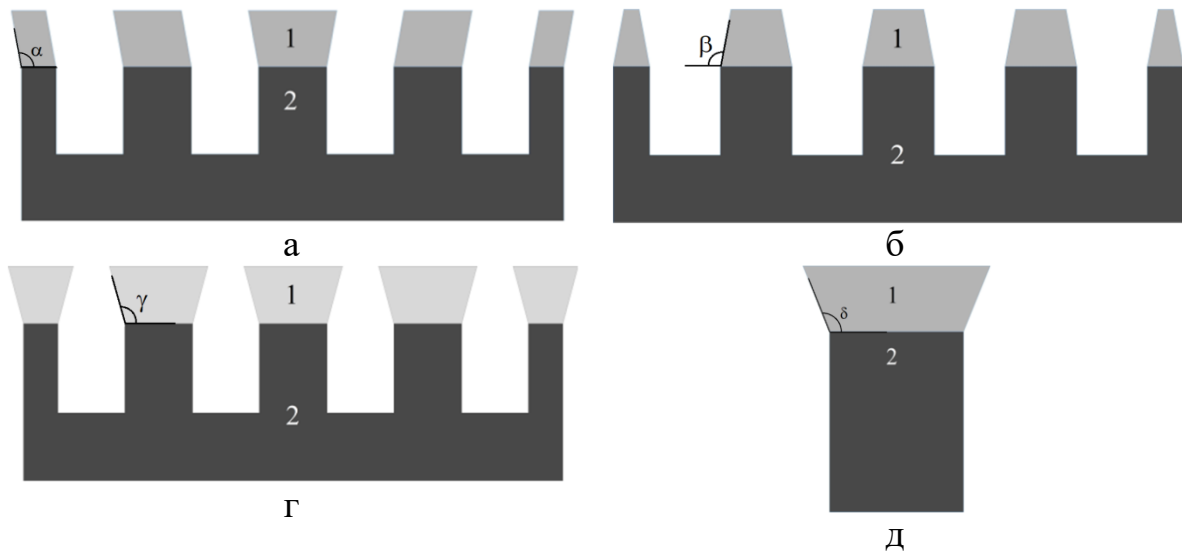


Рисунок 12 – Варианты различной формы вставок из ВМД композита: а – наклонная форма, б – трапециевидная, в – обратная трапециевидная вдоль X, г – обратная трапециевидная вдоль Y

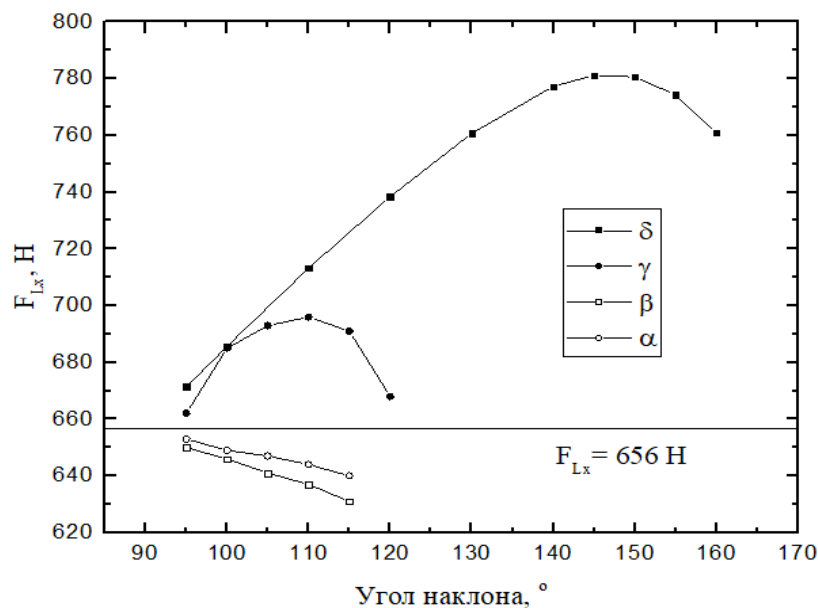


Рисунок 13 – Интегральное значение тангенциальной компоненты силы Лоренца в объеме расплава

Зависимость максимального значения скорости в объеме расплава для двух установок от времени перемешивания представлена на Рисунке 14. Среднее значение скорости для установки с обычными вставками ($V_{cp} \approx 1,06$ м/с) и с обратно трапециевидными ($V_{cp} \approx 0,89$ м/с). Таким образом, изменение формы вставок не только позволило увеличить значение электродинамического усилия в расплаве, но и величину скорости на 19%.

На заключительном этапе исследования оценивалось время и характер выравнивания температуры в объеме расплава. Сравнение максимальной и минимальной температуры в объеме расплава для обеих форм вставок изображено на Рисунке 15.

Как видно из приведенных графиков, использование вставок измененной формы позволило уменьшить время выравнивания температуры на 12% с $t=138$ секунд до $t=126$ секунд.

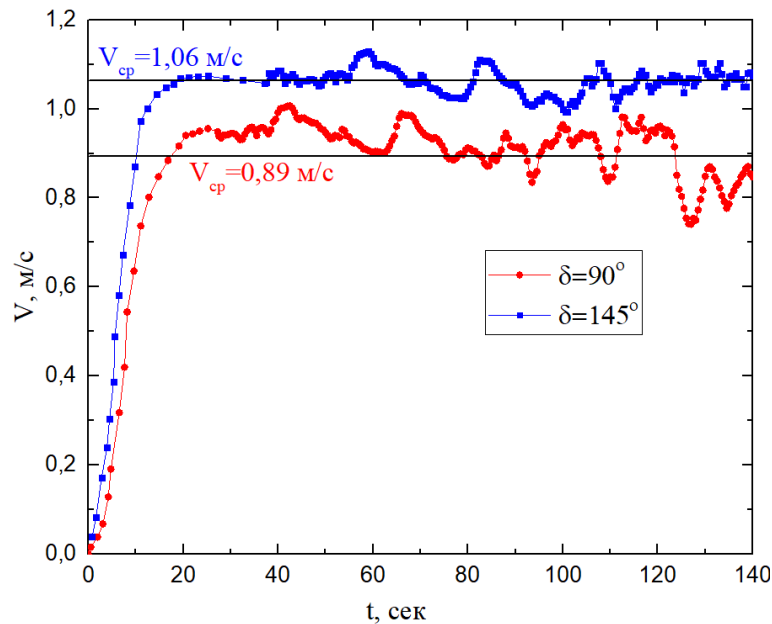


Рисунок 14 – График зависимости максимального значения скорости в расплаве от времени

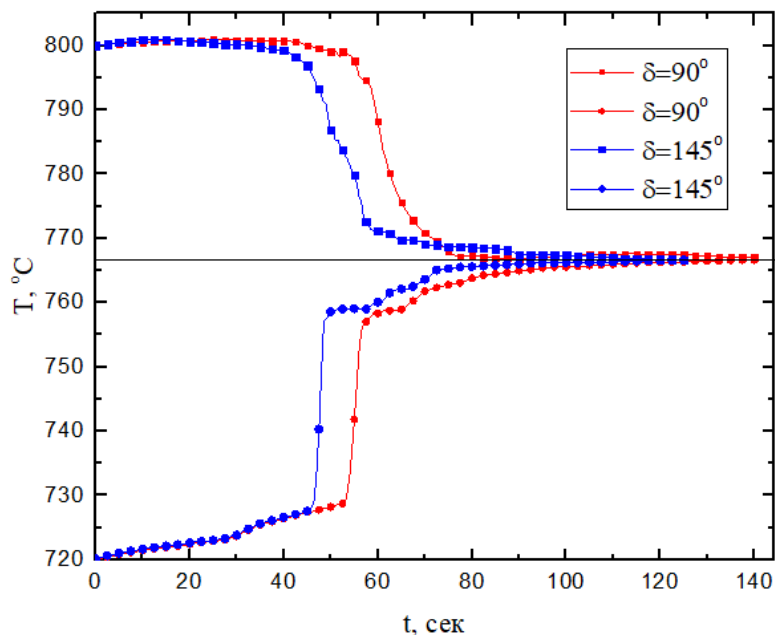


Рисунок 15 – График зависимости изменения максимального и минимального значения температуры от времени перемешивания для установок с углом раствора вставок $\alpha=90^\circ$ и $\alpha=145^\circ$

Ранее в работе, предлагалось проводить оценку влияния внедрения вставок в конструкцию МГД перемешивателя по изменению скорости движения расплава или по изменению времени выполнения технологических процессов. Для полноты картины, необходимо провести оценку изменения энергопотребления для

установок, в конструкции которых используются вставки разной высоты и формы. Для этого необходимо вычислить значение потребляемой мощности выделяемой в обмотках, магнитопроводе и расплаве. Как было сказано ранее, выделением активной мощности во вставках можно пренебречь из-за ее незначительной величины. Полученные значения были разделены на массу перемешиваемого расплава ($m=40$ т), чтобы получить удельные значения потребляемой энергии.

В Таблице 3 приведены результаты анализа сравнения эффективности применения в конструкции МГД перемешивателя вставок высотой 200 мм, 232 мм, 232 мм (измененной формы, $\delta=145^\circ$) и варианта перемешивателя без вставок (рабочий зазор $\Delta=455$ мм).

Таблица 3 – Сравнение эффективности применения вставок

Параметр	0	200	232	232 (изм. форма, $\delta=145^\circ$)
Усредненная максимальная скорость в объеме расплава, м/с	0,28	0,8	0,89	1,06
Энергопотребление (Растворение кремния на вых.), кВт·час/т	4,06	2,18	1,92	1,66
Энергопотребление (Растворение кремния в под.), кВт·час/т	4,58	2,65	2,39	2,08
Энергопотребление (Выравнивание температуры в объеме расплава), кВт·час/т	0,082	0,047	0,037	0,034
Масса вставок, кг	0	344	380	632

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа представляет собой развитие разработок коллектива кафедры ЭЭС ФГАОУ ВО УрФУ в области исследования взаимосвязанных электромагнитных, гидродинамических и теплообменных процессов в МГД перемешивателях. Основные результаты могут быть выражены в следующем:

1. Рассмотрены основные типы конструкций МГД установок для перемешивания жидкого металла, их основные достоинства и недостатки, а так же способы применения. Одним из общих недостатков всех типов конструкций является наличие большого немагнитного зазора между индуктором и расплавленным металлом, что приводит к значительному снижению эффективности их работы. В настоящий момент времени проводятся обширные исследования по повышению эффективности работы металлургических МГД-установок для перемешивания и транспортировки металла, однако, остается слабо

изученным актуальный вопрос уменьшения величины немагнитного зазора без изменения толщины футеровки. Сделан вывод о том, что одним из перспективных способов уменьшения немагнитного рабочего зазора является внедрение в огнеупорную футеровку специальных вставок из ВМД композита.

2. Проведен обзор литературных источников по теме перспективных разработок в области создания магнитомягких материалов, которые могут быть использованы для создания вставок: ферритов и магнитодиэлектриков. Преимуществом ранее разработанных материалов с этой структурой является сочетание диэлектрических и магнитных свойств, однако низкая рабочая температура не позволяет применить их для модернизации металлургических МГД-установок. Металлокерамические соединения на основе железа и оксида алюминия отвечают всем требованиям, предъявляемым к высокотемпературным магнитодиэлектрикам и может быть использован в качестве вставок для модернизации металлургических МГД установок.

3. Были изготовлены образцы нескольких составов ВМД огнеупоров и проведены исследования следующих их свойств: магнитных, электрических, механических и теплофизических. На основе полученных результатов был сделан вывод о дальнейшем использовании вставок из ВМД композита с составом 70% – карбонильное железо, 30% – огнеупорный наполнитель.

4. На основе анализа вычисленных чисел подобия: число Рейнольдса, магнитное число Рейнольдса, параметр МГД-взаимодействия, число Гартмана, число Рэлея. Получено представление о характере процессов, протекающих в модернизированном лабораторном подовом МГД перемешивателе алюминия. Была составлена компьютерная модель описываемой системы, включающая в себя квазистационарную электромагнитную задачу, гидродинамическую задачу турбулентных течений и задачу теплообмена в объеме расплава. Так же были приняты основные допущения.

5. Произведено сравнение результатов компьютерного моделирования теплообменных процессов с экспериментальными данными, полученными для модернизированного лабораторного МГД перемешивателя. На основании этого сравнения сделан вывод о достаточной достоверности компьютерной модели, описывающей электромагнитные, гидродинамические и теплообменные процессы и возможности использовать ее для выполнения расчетов в аналогичных системах.

6. На основе ранее верифицированной компьютерной модели было проведено исследование по модернизации с помощью вставок из ВМД композита промышленного металлургического МГД перемешивателя алюминиевых расплавов в миксере сопротивления объемом 40 тонн. Сравнение полученных результатов компьютерного моделирования электромагнитных, гидродинамических и теплообменных процессов протекающих при перемешивании расплава с помощью не модернизированного и модернизированного МГД перемешивателей позволили сделать вывод об эффективности применения вставок из ВМД композита высотой более 200 мм. Сравнение полученных результатов компьютерного моделирования распределения температурного поля в футеровке и вставках из ВМД композита позволило определить верхнюю границу значения высоты вставок равную 232 мм.

7. Применение вставок из ВМД композита высотой от 200 мм до 232 мм позволяет отказаться от использования немагнитного водоохлаждаемого гнезда, применяемого в промышленном образце установки, при сохранении эффективности перемешивания для вставок высотой 200 мм и повышении эффективности перемешивания на 26% для вставок высотой 232 мм, по сравнению с вариантом конструкции перемешивателя с немагнитным гнездом.

8. Было выполнено дополнительное исследование влияния формы вставок из ВМД композита на эффективность перемешивания расплава. Результатом компьютерного моделирования стало определение формы вставок, при которой эффективность выравнивания температуры возрастает на 12%, эффективность растворения кремния в подовой части возрастает на 18%, на выходе индуктора на 17%, по сравнению с обычными вставками.

9. Применение вставок обычной формы и меньшей высоты позволит уменьшить количество сырья на их производства в 1,6 раза, но увеличит энергопотребление, в среднем, на 10%, по сравнению с перемешивателем, в конструкции которого есть вставки измененной формы высотой 232 мм. Вместе с тем, применение в конструкции МГД перемешивателя вставок обратнотрапециевидной формы ($\delta=145^\circ$) и высотой 232 мм, позволяет уменьшить энергопотребление для различных технологических процессов, в среднем на 57,6%, по сравнению с МГД перемешивателем, в конструкции которого нет вставок из ВМД композита.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Поиск новых материалов обладающих лучшими электромагнитными, теплофизическими и механическими свойствами.
2. Оптимизация формы вставок для получения максимальной эффективности перемешивания при минимальном росте затрат на их производство.
3. Разработка и создание опытного образца МГД перемешивателя металлургического назначения, в конструкции которого будут применен ВМД композит.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. **Болотин, К.Е.** Снижение энергопотребления при производстве синтетического чугуна в индукционной печи / **К.Е. Болотин, В.Э. Фризен, Е.Л. Швыдкий** // Промышленная энергетика. – 2015. – №7. – С. 27–31. (0,58 п. л. / 0,12 п. л.).
2. **Болотин, К.Е.** Многофункциональный плавильный агрегат с электромагнитным вращателем на основе индукционной тигельной печи / **С.Ф. Сарапулов, К.Е. Болотин, И.А. Усков, Е.Л. Швыдкий, С.М. Фаткулин** // Промышленная энергетика. – 2015. – №7. – С. 16–20. (0,58 п. л. / 0,14 п. л.).

3. **Болотин, К.Е.** Энергоэффективные индукционные печи для производства синтетического чугуна / В.И. Лузгин, С.М. Фаткулин, Е.Л. Швыдкий, А.Ю. Петров, А.С. Коптяков, **К.Е. Болотин** // *Металлургия машиностроения*. – 2016. – №1. – С. 2–6. (0,58 п. л. / 0,1 п. л.).

4. **Bolotin, K.** Numerical simulation of the electromagnetic stirrer adapted by using magnetodielectric composite / **K. Bolotin**, I. Smolyanov, E. Shvydkiy [et al.] // *Magnetohydrodynamics*. – 2017. – V. 53. – № 4. – P. 723–730. (0,92 п. л. / 0,6 п. л.). (WoS).

5. **Bolotin, K.** Numerical simulation of double side linear induction pump for liquid magnesium / F. Sarapulov, I. Smolyanov, **K. Bolotin** [et al.] // *Magnetohydrodynamics*. – 2017. – V. 53. – № 4. – P. 603–609. (0,81 п. л. / 0,18 п. л.). (WoS).

Другие публикации

6. **Bolotin, K. E.** Numerical simulation of electromagnetic processes of the modernized MHD-pump for dispensing molten aluminium from the stationary induction furnace / **K. E. Bolotin**, E.L. Shvydkiy, V. E. Frizen [et al.] // *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. St Petersburg, 2017. – P. 1488–1490. (0,35 п. л. / 0,16 п. л.). (Scopus).

7. **Bolotin, K. E.** Numerical simulation of mhd stirrer for 12 ton metallurgical aggregate / **K. E. Bolotin**, V. E. Frizen, I. F. Sokolov [et al.] // *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. St Petersburg, 2018. – P. 585–587. (0,35 п. л. / 0,21 п. л.). (Scopus).

8. **Bolotin, K. E.** Numerical and experimental simulation of a bottom electromagnetic stirrer with a rotating field / **K. E. Bolotin**, V. E. Frizen, E. L. Shvidkiy // *18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2017*. Kutná Hora, 2017. – P. 265–268. (0,46 п. л. / 0,28 п. л.). (Scopus).

9. **Bolotin, K.** Numerical modeling of the travelling magnetic field stirrer for liquid lithium / E. Shvydkiy, V. Zaharov, **K. Bolotin** [et al.] // *VIII International Scientific Colloquium "Modelling for Materials Processing"*, 2017. – P. 89–94. (0,69 п. л. / 0,13 п. л.).

10. **Bolotin, K. E.** Calculation methods of tubular linear induction motor / E. L. Shvidkiy, F. N. Sarapulov, **K. E. Bolotin** [et al.] // *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. St Petersburg, 2017. – P. 1579–1580. (0,23 п. л. / 0,03 п. л.). (Scopus).

11. **Bolotin, K. E.** Induction crucible furnace with dual frequency power supply / V.E. Frizen, V.I. Luzgin, K.E. Bolotin [et al.] // *15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems*, 2017. – P. 423–426. (0,46 п. л. / 0,09 п. л.). (Scopus)