

На правах рукописи



Михайлов Дмитрий Александрович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МИКСЕР С КОМБИНИРОВАННЫМ
НАГРЕВОМ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Темеров Александр Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Алиферов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент
Бронов Сергей Александрович

Ведущая организация: ООО «РУСАЛ Инженерно-
технологический центр» (г. Красноярск)

Защита состоится «25» марта 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.06 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. УЛК 115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета.

Автореферат разослан «21» февраля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Р. Ю. Царев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время основными производителями алюминиевого проката предъявляются все более высокие требования к качеству и стоимости алюминиевых сплавов, приготовление которых осуществляется в электротехнических комплексах, включающих в себя электрические печи, миксеры и внепечное оборудование. Снижение качества алюминиевых сплавов, приготавливаемых в электрических миксерах, связано с низкой стабильностью температуры расплава и высоким содержанием неметаллических включений в литье, а повышение стоимости сплавов обусловлено низкой энергетической эффективностью систем нагрева электрических миксеров и высокой стоимостью внепечного оборудования.

Для улучшения качества алюминиевых сплавов и снижения затрат на их производство, в электрических миксерах необходимо обеспечить возможность повышения равномерности температурного перепада и понижения содержания неметаллических включений в литье, а также улучшения энергетических характеристик системы нагрева. Разработка и создание электрических миксеров с комбинированным нагревом представляет качественно новый уровень в печестроении и открывает возможность получения высококачественного металла за счет комбинированного нагрева, предполагающего косвенный и прямой нагрев расплава с помощью сводового и подового электронагревателей.

Основные положения диссертационной работы разрабатывались в рамках проектов «Электрическая печь с высокой тепловой эффективностью для приготовления сплавов на основе алюминия» и «Разработка нового типа электротермического устройства для приготовления высококачественных алюминиевых сплавов» Программы развития ФГОУ ВПО Сибирский федеральный университет на 2007-2010 годы.

Вопросам проектирования электрических миксеров для приготовления алюминиевых сплавов посвящены работы А. М. Вайнберга, С. А. Фарбмана, А. Д. Свенчанского, Б. С. Громова, а также зарубежных ученых J. L. Robertson, P. E. Anderson, Y. J. Bhatt. Значительный вклад в исследование процессов приготовления алюминиевых сплавов в электрических миксерах внесли А. Ф. Колесниченко, В. Н. Тимофеев, А. А. Темеров, Е. А. Павлов.

Известные методики проектирования электрических миксеров не позволяют совместно анализировать электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы и выявлять соотношения мощностей подового и сводового электронагревателей на стадиях нагрева, выдержки и литья. Таким образом, раздельное управление интенсивностью нагрева верхних и нижних слоев расплава на основании взаимосвязанного анализа электромагнитного, гидродинамического и теплового полей для повышения энергетической эффективности миксера и качества приготавливаемых алюминиевых сплавов является актуальной задачей.

Объект исследования – электрический миксер с комбинированным нагревом для приготовления сплавов на основе алюминия.

Предметом исследования являются взаимосвязи электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в электрическом миксере с комбинированным нагревом и разработанный на их основе алгоритм управления режимами работы системы нагрева.

Цель диссертационной работы – разработка принципов управления системой нагрева электрического миксера с комбинированным нагревом расплава на основе исследования взаимосвязей электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов для повышения энергетической эффективности устройства и качества приготавливаемых сплавов.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ взаимосвязей между конструктивным исполнением систем нагрева электрических миксеров и качеством приготавливаемых в них алюминиевых сплавов.

2. Разработать математическую модель электрического миксера с комбинированным нагревом расплава, оснащенного подовым и сводовым электронагревателями прямого и косвенного нагрева, для взаимосвязанного анализа электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов при изменении основных параметров, режимов и условий работы системы нагрева.

3. Выявить зависимости изменения электрического КПД, коэффициента мощности и мощностей тепловыделения в миксере от параметров и условий работы электронагревателей, а также оценить влияние различных режимов работы системы нагрева на качество приготавливаемого расплава на стадиях нагрева, выдержки и литья.

4. Подтвердить адекватность разработанной математической модели в ходе проведения экспериментов на физической модели и опытно-промышленном образце сводового электронагревателя.

5. Разработать алгоритм управления режимами работы системы нагрева и практические рекомендации по повышению энергетической эффективности системы нагрева и улучшению качества сплавов, приготавливаемых в электрических миксерах с комбинированным нагревом.

Основная идея диссертации заключается в управлении комбинированным нагревом расплава в электрическом миксере с применением алгоритма управления режимами работы системы нагрева, разработанного на основе анализа взаимосвязей физических процессов в системе «миксер с комбинированным нагревом – расплав».

Методы исследований. В настоящей работе использованы методы теории электромагнетизма, гидродинамики, теплообмена, электрических цепей и вычислительного эксперимента, методы математического анализа и физического моделирования. Решение задачи анализа полей осуществлялось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Multiphysics.

Основные результаты, выносимые на защиту и представляющие научную новизну:

1. Разработана математическая модель электрического миксера с комбинированным нагревом, оснащенного подовым и сводовым

электронагревателями прямого и косвенного нагрева, позволяющая осуществлять взаимосвязанный анализ электромагнитного, гидродинамического и теплового полей при реализации основных режимов работы системы нагрева на стадиях нагрева, выдержки и литья.

2. Определены зависимости электрического КПД миксера, коэффициента мощности миксера, мощностей тепловыделения в ванне, подовом и сводовом электронагревателях от параметров электронагревателей, а также зависимости изменения температурного перепада и распределения неметаллических включений по высоте ванны от режимов работы системы нагрева, которые позволяют оценивать энергетическую эффективность устройства и прогнозировать качество приготавливаемых алюминиевых сплавов.

3. Разработан алгоритм управления режимами работы системы нагрева миксера на основе анализа взаимосвязей электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов, позволяющий управлять качеством приготавливаемого алюминиевого сплава на стадиях нагрева, выдержки и литья в соответствии с заданными требованиями технологии.

Значение для теории. Определены и теоретически обоснованы принципы проектирования электрических миксеров с комбинированным нагревом расплава с подовым и сводовым электронагревателями в части моделирования и анализа воздействия комбинированного способа нагрева на электромагнитное, гидродинамическое и тепловое поля миксера на стадиях нагрева, выдержки и литья.

Практическая значимость работы состоит в том, что коэффициент мощности миксера и тепловая поверхностная мощность сводового электронагревателя повышаются с 0,17 до 0,45 и в 2 раза соответственно за счет использования новых конструкций подового (патент РФ № 2371652) и сводового электронагревателей, а улучшение качества приготавливаемых сплавов достигается применением разработанного алгоритма управления режимами работы системы нагрева, позволяющего снизить температурный перепад по высоте расплава до 6,5 °С/м и содержание неметаллических включений в верхней части ванны от общего их количества до 49 %.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов математического моделирования с результатами физического моделирования и натурных экспериментов (относительная погрешность 9 % и 6,12 % соответственно).

Использование результатов работы осуществлялось при разработке систем нагрева электрических миксеров сопротивления ООО ЗМИ «Сиблента» (г. Красноярск), при проектировании комплекса лабораторных установок ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), а также в учебном процессе студентов специальности 140605 «Электротехнологические установки и системы» и подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях: Научно – техническая конференция с международным участием «Электротехника,

электромеханика, электротехнологии», Новосибирск, 2005 г.; XIII Международная научно – практическая конференция «Современная техника и технологии», Томск, 2007 г.; Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука – третье тысячелетие», Красноярск, 2005, 2008 гг.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 14 печатных работах, в том числе в 4 статьях из перечня научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, а также 1 патенте на изобретение РФ.

Личный вклад автора заключается в постановке и решении задач исследования, проведении экспериментов, обработке полученных данных, получении основных результатов, выносимых на защиту.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, выполнена на 162 страницах машинописного текста, содержит 130 рисунков, 8 таблиц, список использованных источников из 129 наименований и 4 приложения на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи работы, определены методы исследования, изложены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, результаты апробации работы.

В первом разделе выполнен анализ литературных источников, позволивший установить взаимосвязь между конструктивным исполнением систем нагрева и качеством сплавов, приготавливаемых в миксерах с расположением электронагревателей в подине и в миксерах с расположением электронагревателей под сводом. В процессе приготовления расплава в миксерах первого типа происходит выравнивание температуры в металле, которое сопровождается распространением неметаллических включений по всему объему ванны. Процесс приготовления расплава в миксерах, оснащенных сводовыми электронагревателями, характеризуется активным окислением поверхности расплава и повышенным температурным перепадом по высоте ванны, который достигает 90 °С/м.

Рассмотрены конструктивные особенности сводовых и подовых электронагревателей. Основными недостатками сводовых электронагревателей являются малая доля тепловой мощности, излучаемой на зеркало металла и небольшой срок эксплуатации. К недостаткам конструкции подовых электронагревателей относится зашлаковывание канальных частей неметаллическими частицами, малая механическая прочность подины и низкий коэффициент мощности, который не превышает 0,17.

Определены основные требования технологии приготовления алюминиевых сплавов в электрических миксерах. Равномерность нагрева расплава и угар металла зависят от температуры поверхности расплава, интенсивности движения масс металла и времени его приготовления на стадии нагрева. На стадии выдержки необходимо, чтобы содержание неметаллических

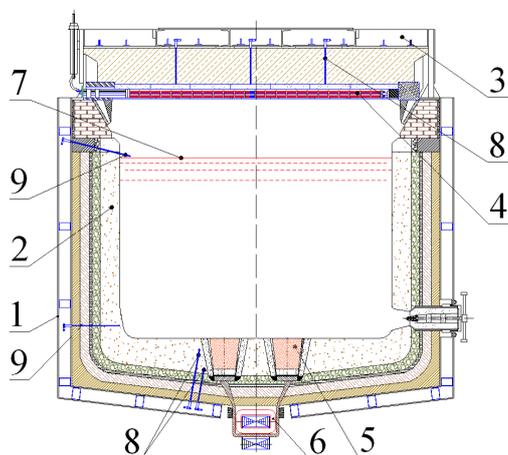


Рисунок 1 – Миксер с комбинированным нагревом емкостью 40 тонн

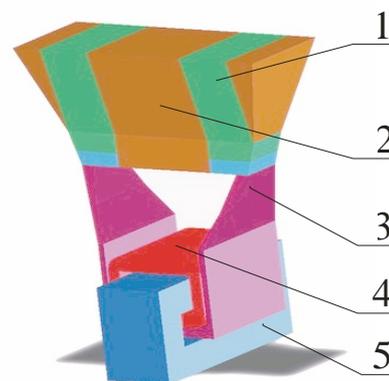


Рисунок 2 – Подовый электронагреватель

включений (окись алюминия со средней плотностью 3700 кг/м^3) в верхней части ванны было наименьшим, для чего требуется производить оттаивание расплава. На стадии литья качество расплава определяется стабильностью температурного перепада и наличием неметаллических включений в литье, ввиду чего температурный перепад по высоте расплава должен не превышать $8 \text{ }^\circ\text{C/м}$, температуру расплава необходимо поддерживать на уровне $(695 \div 750) \text{ }^\circ\text{C}$, а неметаллические частицы должны быть сосредоточены в области подины.

В результате анализа способов нагрева расплава было установлено, что комбинированный нагрев расплава позволяет изменять интенсивность нагрева верхних и нижних слоев расплава. Такой способ нагрева может быть реализован в миксере с комбинированным нагревом, в котором электронагреватели располагаются под сводом и в подине (рисунок 1). Миксер предложенной конструкции включает металлический каркас 1, футеровку 2, свод 3, сводовый электронагреватель 4, подовый электронагреватель 5, а также термопары 8 и 9. Разработанный в ходе исследований подовый электронагреватель (патент РФ № 2371652) состоит из изоляционного блока 2, резистивных блоков 1, токоподвода 3, первичной обмотки 4 и магнитопровода 5 (рисунок 2).

Обоснована целесообразность взаимосвязанного анализа электромагнитного, гидродинамического и теплового полей миксера с комбинированным нагревом с помощью математической модели.

Во втором разделе представлена математическая модель электрического миксера с комбинированным нагревом емкостью 40 тонн, которая позволяет взаимосвязано анализировать электромагнитное, гидродинамическое и тепловое поля системы «миксер с комбинированным нагревом – расплав» на стадии нагрева (режим работы 1, нагрев подовым электронагревателем), выдержки (режим работы 2, нагрев сводовым электронагревателем) и литья (режим работы 3, нагрев подовым и сводовым электронагревателями).

Математическая модель позволяет проводить взаимосвязанный анализ электромагнитного, гидродинамического и теплового полей с изменением варьируемых параметров, основными из которых являются: высота расплава h ,

размеры ванны (l_1 и l_2), площадь резистивного блока $S_{Ip.б.}$, высота резистивного блока $h_{Ip.б.}$, расстояние между резистивными блоками l и высота шлакового слоя $h_{шл.}$. Расчетная область включает в себя: внешнее пространство, футеровку, расплав, а также сводовый и подовый электронагреватели.

Допущения электромагнитной задачи: 1) не учитывается влияние несущественных деталей конструкции на электромагнитное поле; 2) в расчетной области отсутствуют свободные заряды; 3) расчетную область окружает среда с идеальными магнитными свойствами ($\mu=\infty$); 4) электромагнитное поле сосредоточено в некотором пространстве, размеры которого достаточно велики и не вносят существенного искажения; 5) абсолютная магнитная проницаемость и электропроводность всех материалов изотропны.

Электромагнитное поле описывается системой уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = g(\bar{E} + [\bar{u} \times \bar{B}]), \quad \operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}, \quad \operatorname{div} \bar{B} = 0, \quad (1)$$

где \bar{H} – напряжённость магнитного поля, А/м; \bar{E} – напряжённость электрического поля, В/м; \bar{B} – индукция магнитного поля, Тл; t – время, с; γ – удельная электрическая проводимость, См/м; \bar{u} – скорость, м/с.

Решение системы уравнений сводится к нахождению уравнений векторного потенциала и неразрывности с учетом замены $\bar{B} = \operatorname{rot} \bar{A}$, второго допущения и применением кулоновской калибровки $\operatorname{div} \bar{A} = 0$:

$$\nabla^2 \bar{A} = -m_a \bar{d}, \quad \operatorname{div} \left(-g \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \bar{u} \times g \operatorname{rot} \bar{A} \right) = 0, \quad (2)$$

где \bar{d} – вектор плотности полного тока, А/м²; \bar{A} – векторный потенциал, В/м·с; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м.

Величины реактивной Q и активной P мощностей, а также активных составляющих сил Лоренца F_{LRe} используются в качестве начальных условий в тепловом и гидродинамическом расчетах и определяются как:

$$Q = \sum_{i=1}^n \omega \int_V \bar{H} \cdot \bar{B} dV, \quad P = \sum_{i=1}^n \bar{d}_{Re}^2 \cdot r, \quad F_{LRe} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_V \bar{d}_{Re} \cdot \bar{B} dV, \quad (3)$$

где ρ – электрическое сопротивление, Ом·м; ω – угловая частота, рад/с.

Граничные условия определяются заданием составляющих магнитного векторного потенциала на границе расчетной области и окружающей среды:

$$\frac{\partial \bar{A}_t}{\partial n} = 0, \quad \bar{A}_n = 0 \quad (4)$$

Допущения гидродинамической и тепловой задач: 1) пренебрегается влиянием каркаса, летки и элементов крепежа системы нагрева на тепловые потери миксера; 2) динамическая вязкость, теплопроводность и теплоемкость расплава алюминия, а также плотность, теплопроводность и теплоемкость воздуха и слоев футеровки изотропны; 3) расплав является однородным без содержания неметаллических включений, а его поверхность свободна от шлака; 4) температура окружающей среды постоянна и неизменна во времени; 5) расплав является несжимаемой маловязкой жидкостью.

В расчетной области гидродинамической задачи турбулентные течения в ванне миксера описываются системой уравнений Навье-Стокса (5) – (7):

$$r \cdot \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} + h \cdot \text{div}(\text{grad} \bar{V}_x) - r \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} (\overline{V_x'^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{V_x' V_y'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{V_x' V_z'}) \right] + \bar{F}_{LRe x}, \quad (5)$$

$$r \cdot \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} + h \cdot \text{div}(\text{grad} \bar{V}_y) - r \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} (\overline{V_y' V_x'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{V_y'^2}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{V_y' V_z'}) \right] + \bar{F}_{LRe y}, \quad (6)$$

$$r \cdot \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} + h \cdot \text{div}(\text{grad} \bar{V}_z) - r \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} (\overline{V_z' V_x'}) + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{V_z' V_y'}) + \frac{\partial}{\partial z} (\overline{V_z'^2}) \right] + \bar{F}_{LRe z} + r \cdot g_z, \quad (7)$$

где, \bar{V} – скорость, м/с; $\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z$ – x, y и z компоненты скорости, м/с; $\bar{V}_x', \bar{V}_y', \bar{V}_z'$ – флуктуации x, y и z компонент скорости; ρ – удельная плотность расплава, кг/м³; η – эффективная вязкость расплава, Па·с; $\bar{F}_{Lx}, \bar{F}_{Ly}, \bar{F}_{Lz}$ – x, y и z компоненты силы Лоренца, Н; P – давление, Па.

Система уравнений Навье-Стокса замыкается уравнениями стандартной k - ε модели турбулентности, имеющими вид:

$$r \cdot \frac{\partial(k)}{\partial t} + r \cdot \text{div}(\bar{V} \cdot k) = \text{div} \left[\left(\frac{h_T}{s_k} \right) \text{grad} k \right] + P_k - r \cdot e, \quad (8)$$

$$r \cdot \frac{\partial(e)}{\partial t} + r \cdot \text{div}(\bar{V} \cdot e) = \text{div} \left[\left(\frac{h_T}{s_e} \right) \text{grad} e \right] + C_{1e} \frac{e}{k} P_k - C_{2e} r \frac{e^2}{k}, \quad (9)$$

где, η_T – турбулентная вязкость расплава, Па·с; k – турбулентная кинетическая энергия, ε – диссипация турбулентной кинетической энергии, $C_{1e}, C_{2e}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – константы k - ε модели турбулентности, P_k – выработка турбулентности.

В качестве граничных условий задаются касательные составляющие скоростей на стенках с учетом «прилипания» жидкости к стенкам ванны:

$$\bar{V}_{t_0 st} = 0. \quad (10)$$

Решение тепловой задачи сводится к нахождению температуры расплава, ограждающей футеровки и электронагревателей в каждый момент времени.

Теплообмен внутри расплава учитывается уравнениями неразрывности (11) и Фурье – Кирхгофа (12), дополненными совокупностью граничных условий (13) и (14), которые определяют теплообмен расплава со сводовым электронагревателем за счет излучения и теплопроводности и теплообмен расплава с подовым электронагревателем за счет теплопроводности:

$$r \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + r \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} + r \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} = 0, \quad (11)$$

$$c \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + c \cdot r \cdot \left(\bar{V}_x \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{V}_y \frac{\partial T}{\partial y} + \bar{V}_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = I \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2h \cdot \left[\left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$+h \cdot \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} \right)^2 + P, \quad (12)$$

$$-I \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{x,y,z} = -I_{o.p} \cdot \left(\frac{\partial T_{o.p}}{\partial x} + \frac{\partial T_{o.p}}{\partial y} + \frac{\partial T_{o.p}}{\partial z} \right)_{x,y,z}, \quad (13)$$

$$-I \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{x,y,z} = -I_v \cdot \left(\frac{\partial T_v}{\partial x} + \frac{\partial T_v}{\partial y} + \frac{\partial T_v}{\partial z} \right)_{x,y,z} + e \cdot c_0 (T_{s.n}^4 - T^4), \quad (14)$$

где c – удельная теплоемкость расплава, Дж/(кг·°C); T – температура расплава, °C; T_v – температура воздуха, °C; $T_{s.n}$ – температура на поверхности сводового электронагревателя, °C; $T_{o.p}$ – температура контактирующих с расплавом ограждающих поверхностей, °C; P – удельная мощность тепловыделения, Вт/м³; λ – теплопроводность расплава, Вт/(м·°C); λ_v – теплопроводность воздуха, Вт/(м·°C); $\lambda_{o.p}$ – теплопроводность контактирующих с расплавом ограждающих поверхностей, Вт/(м·°C); ε – степень черноты поверхности расплава; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

В области сводового и подового электронагревателей процесс теплообмена описывается уравнением Фурье – Кирхгофа без членов, учитывающих конвекцию, а в области футеровки теплообмен происходит за счет теплопроводности и также описывается данным уравнением, которое не содержит членов, учитывающих конвекцию и мощность тепловыделения внутренними источниками теплоты.

Граничное условие (13) определяет температурное поле на границах «футеровка – расплав» и «подовый электронагреватель – расплав» при теплообмене между расплавом и ограждающими поверхностями ванны, а граничное условие (14) определяет температурное поле на границе «сводовый электронагреватель – расплав» при теплообмене между поверхностью расплава и сводовым электронагревателем. На поверхности миксера теплообмен с окружающей средой описывается граничными условиями третьего рода:

$$q_{o.s} = \alpha \cdot (T_{pov} - T_{o.s}), \quad (15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $T_{o.s}$ – температура окружающей среды, °C; T_{pov} – температура поверхности миксера, °C.

Однозначное решение тепловой задачи определяется заданием граничных условий и вводом результатов решения электромагнитной задачи в начальный момент времени t^0 . Также в начальный момент времени t^0 задаются краевые условия для гидродинамической и тепловой задач: температура окружающей среды $T_{o.s}^0$, на поверхности кожуха T_{pov}^0 , на поверхности нагревательных элементов $T_{n.e}^0$ и скорости в расплаве V^0 , для задания которых используются результаты расчета электромагнитной задачи – распределение сил Лоренца в расплаве F_{LRe}^0 .

Приведённые уравнения в полной мере описывают электромагнитное, тепловое и гидродинамическое поля, а принятые допущения позволяют с достаточной точностью воссоздать исследуемые процессы.

В третьем разделе анализируются результаты численного моделирования в системе «миксер с комбинированным нагревом – расплав».

Исследование миксера производилось при изменении следующих параметров: активная мощность сводового P_1 и подового P_2 электронагревателей изменялась от 0 до 60 кВт; величина тока в нагревательных элементах сводового электронагревателя I_1 и во вторичном витке подового электронагревателя I_2 изменялись соответственно в пределах (0÷160) А и (0÷1090) А; частота питающего напряжения подового электронагревателя f изменялась в пределах (2÷100) Гц; коэффициент теплопроводности теплопроводного слоя сводового электронагревателя I_{mc} изменялся в пределах (2÷7) Вт/(м·°С); расстояние между резистивными блоками l изменялось в пределах (0,1÷0,7) м, толщина слоя шлака $h_{шл}$ варьировалась в пределах (0,02÷0,16) м, высота расплава h изменялась от 0 до 1,82 м, а относительное активное сопротивление $R_{отн}$ изменялось в диапазоне (0,32÷0,98). Величина относительного сопротивления $R_{отн}$ определяется как:

$$R_{отн} = r_{рб} / r_2, \quad (16)$$

где $r_{рб}$ – активное сопротивление резистивного блока, Ом; r_2 – активное сопротивление вторичного витка подового электронагревателя, Ом.

В результате решения задач были получены дифференциальные характеристики электромагнитного, теплового и гидродинамического полей миксера. Решение электромагнитной задачи в расчетной области сопровождалось составлением эквивалентных электрических схем замещения системы нагрева, нахождением величин сопротивлений соответствующих активных и реактивных элементов цепи, а также последующим определением значений электрического КПД и коэффициента мощности миксера для различных режимов и условий работы системы нагрева.

Анализ результатов решения электромагнитной задачи показал, что энергетические характеристики миксера в режиме работы системы нагрева 2 зависят от параметров сводового электронагревателя. В данном режиме работы электрический КПД $\eta_{эл}$ и коэффициент мощности $\cos\varphi$ миксера равны соответственно 0,95 и 0,92.

В режиме работы 1 энергетические характеристики миксера зависят от параметров подового электронагревателя и сопротивления ванны с расплавом. В ходе анализа изменения активной P и реактивной Q мощностей миксера, а также изменения активной мощности потерь $P_{потерь}$, мощности подового электронагревателя P_2 и мощности выделяемой в расплаве $P_{распл}$, от частоты питающего напряжения f (рисунки 3 и 4), был определен диапазон частот (25÷75 Гц), в котором электрический КПД $\eta_{эл}$ и коэффициент мощности $\cos\varphi$ миксера достигают своих наибольших значений. Частота питающего напряжения была принята равной 50 Гц.

Зависимость мощности тепловыделения в слое шлака $P_{шл}$, который может накапливаться на поверхности резистивных блоков, а также мощности тепловыделения в резистивных блоках P_2 от толщины слоя шлака $h_{шл}$, приведены на рисунках 5 и 6 соответственно. Перераспределение мощности

тепловыделения между резистивными блоками и ванной вызвано повышением сопротивления ванны. При толщине слоя шлака в 0,16 м и концентрации окиси алюминия 30 % наблюдается понижение мощности тепловыделения в резистивных блоках на 7 %, что является причиной снижения электрического КПД миксера $\eta_{эл}$ не более чем на 3 %.

На рисунке 7 показана зависимость мощности тепловыделения в расплаве $P_{распл}$ от изменения расстояния между резистивными блоками l при приготовлении различных алюминиевых сплавов, а на рисунке 8 представлена зависимость электрического КПД миксера $\eta_{эл}$ от расстояния l . Возникающие вихревые токи являются причиной роста мощности электрических потерь $P_{потерь}$ в токоподводе подового электронагревателя. При увеличении расстояния между блоками l от 0,1 м до 0,3 м тепловыделение в расплаве $P_{распл}$ увеличивается на 34 %, которое сопровождается снижением коэффициента мощности $\cos\varphi$ на 13 % и понижением электрического КПД миксера $\eta_{эл}$ на 7 % ввиду роста мощности потерь в токоподводах и увеличения реактивного сопротивления.

На рисунках 9 – 10 представлены зависимости коэффициента мощности $\cos\varphi$ и электрического КПД миксера от относительного сопротивления подового электронагревателя $R_{отн}$ при заполнении ванны расплавом на 5%, 10%, 20% и 100%. Анализ зависимостей показал, что коэффициент мощности $\cos\varphi$ и

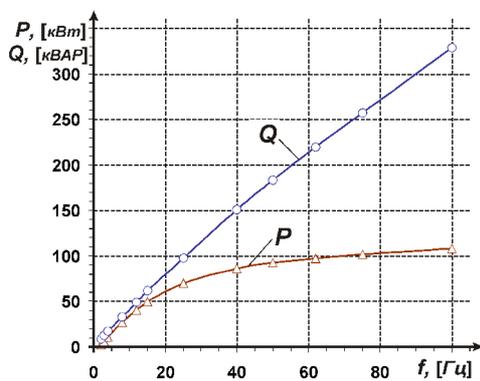


Рисунок 3 – Зависимость мощностей P и Q от частоты f

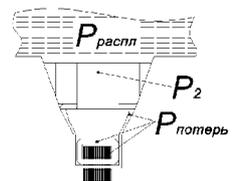
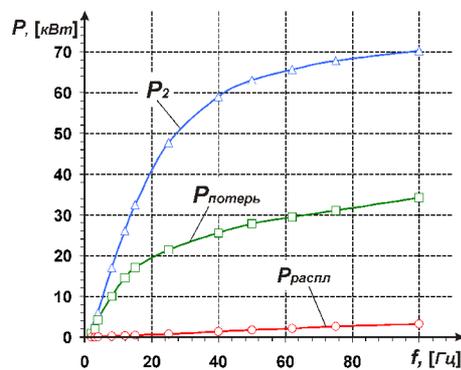


Рисунок 4 – Зависимость мощностей $P_{потерь}$, $P_{распл}$ и P_2 от частоты f

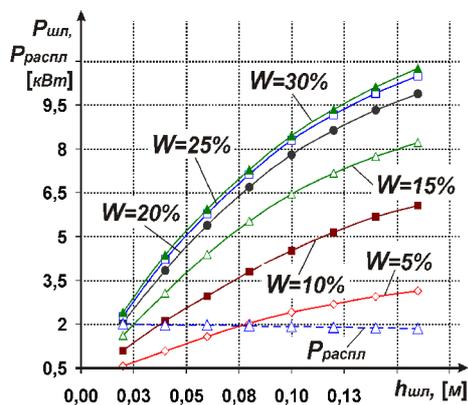


Рисунок 5 – Зависимость мощности $P_{млт}$ от высоты $h_{мл}$

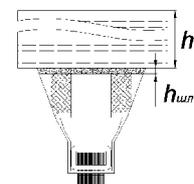
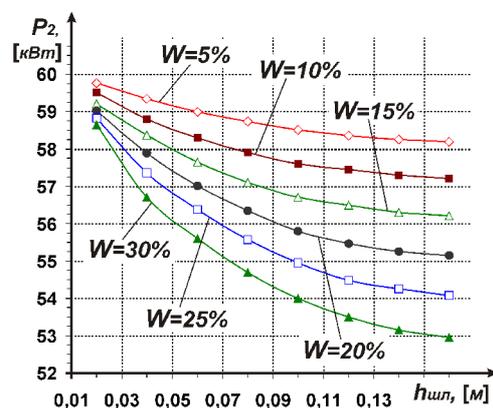


Рисунок 6 – Зависимость мощности P_2 от высоты $h_{мл}$

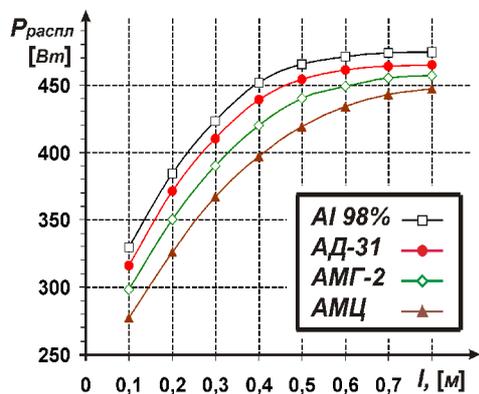


Рисунок 7 – Зависимость мощности $P_{распл}$ от расстояния l

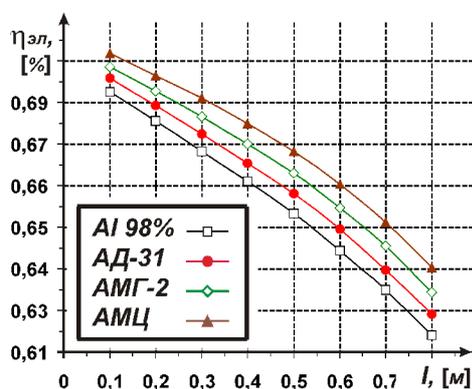


Рисунок 8 – Зависимость $\eta_{эл}$ миксера от расстояния l

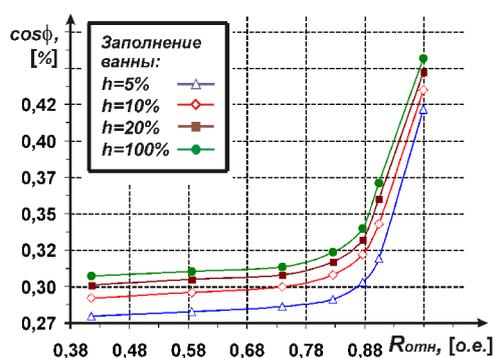
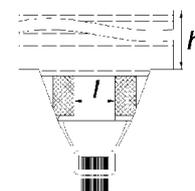


Рисунок 9 – Зависимость $\cos\varphi$ миксера от $R_{отн}$

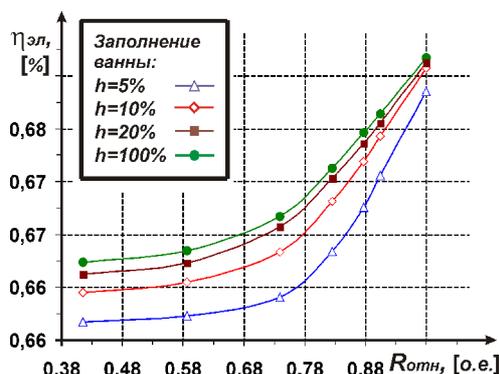
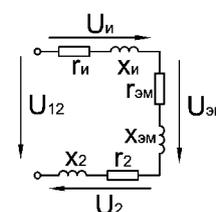


Рисунок 10 – Зависимость $\eta_{эл}$ миксера от $R_{отн}$



электрический КПД $\eta_{эл}$ миксера достигают своих максимальных значений, равных соответственно 0,45 и 0,68 при относительном сопротивлении $(0,83 \div 0,98)$ о.е. и максимальном уровне расплава в ванне, однако при высоте расплава в ванне в 0,1 м и относительном сопротивлении менее 0,4 о.е. электрический КПД $\eta_{эл}$ и коэффициента мощности $\cos\varphi$ имеют наименьшие значения, которые составляют соответственно 0,66 и 0,27, из чего следует, что для повышения энергетической эффективности миксера приготовление сплавов необходимо осуществлять при наибольшем заполнении ванны расплавом. Такой характер изменения энергетических характеристик подового электронагревателя обуславливает высокую надежность и стабильность работы миксера при различных условиях и режимах работы системы нагрева.

Ввиду того, что производительность миксера и качество расплава зависят от режимов работы системы нагрева, необходимо было решить гидродинамическую и тепловую задачи и определить значения соотношений мощностей сводового и подового электронагревателей P_1/P_2 на трех стадиях приготовления, при которых можно достичь наилучшего качества расплава и не понизить производительности миксера. Учитывая то, что производительность миксера определяется длительностью стадии нагрева расплава, а качество приготавливаемого сплава содержанием неметаллических включений в литье и

стабильностью температурного перепада, целевой функцией на стадии нагрева является время нагрева расплава $t_{нагр}(P_1/P_2) \rightarrow \min$, целевой функцией на стадии выдержки – содержание неметаллических включений в верхней части ванны от общего их количества $W_{верх}(P_1/P_2) \rightarrow \min$, а на стадии литья – температурный перепад в слоях расплава и содержание неметаллических включений в верхней части ванны от общего их количества $W_{верх}, \Delta T_{расплСЛ}(P_1/P_2) \rightarrow \min$.

Для определения значений $t_{нагр}$, $W_{верх}$ и $\Delta T_{расплСЛ}$, в соответствии с нахождением решений целевых функций на трех стадиях, были построены зависимости изменения времени нагрева $t_{нагр}$, содержания неметаллических включений в верхней части ванны $W_{верх}$ и температурного перепада $\Delta T_{расплСЛ}$ от соотношения мощностей P_1/P_2 , которое изменялось в диапазоне (0/1÷1/0) (рисунок 11).

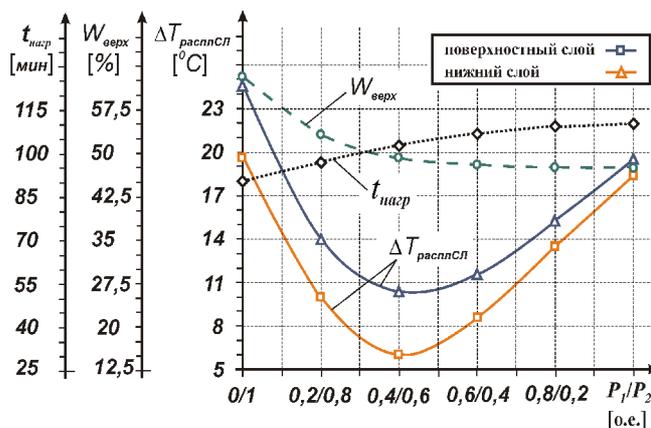


Рисунок 11 – Изменение $t_{нагр}$, $\Delta T_{расплСЛ}$ и $W_{верх}$ при различных соотношениях P_1/P_2

Наиболее быстрый нагрев расплава обеспечивается при соотношении мощностей 0/1 за счет интенсификации тепломассообменных процессов в ванне. Содержание неметаллических включений в верхней части ванны от общего их количества $W_{верх}$, определяющее качество расплава на стадии выдержки, достигает своего наименьшего значения при соотношении мощностей равном 1/0 ввиду наименьшей интенсивности конвективного движения металла при нагреве расплава сверху. На стадии литья минимум температурного перепада $\Delta T_{расплСЛ}$ наблюдается при нагреве расплава нижним и верхнем электронагревателями, когда соотношение мощностей P_1/P_2 составляет 0,4/0,6. При этом, в диапазоне соотношений мощностей (0,4/0,6÷1/0), изменение содержания неметаллических включений в верхней части ванны от общего их количества $W_{верх}$ пренебрежимо мало (не более чем на 2 % при шаге мощности 0,2 о.е.). В соответствии с целевой функцией, наилучшее сочетание значений $W_{верх}$ и $\Delta T_{расплСЛ}$ наблюдается при соотношении мощностей P_1/P_2 равном 0,4/0,6. Ввиду этого, для достижения наибольшей производительности и наилучшего качества расплава, необходимо, чтобы соотношение мощностей P_1/P_2 на стадиях нагрева, выдержки и литья составляло соответственно 0/1, 1/0 и 0,4/0,6 (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты поиска

Стадия приготовления	Параметры		Целевые функции		
	P_1 , кВт	P_2 , кВт	$\Delta T_{расплСЛ}$, °C	$W_{верх}$, %	t , мин
Нагрев	0	60	25	63	90
Выдержка	60	0	20	46,5	110
Литье	24	36	10	49	78

На рисунке 12 представлен алгоритм управления режимами работы системы нагрева, разработанный в ходе анализа зависимостей распределения температурного перепада, неметаллических включений, скорости и интенсивности нагрева расплава на различных режимах работы системы нагрева на стадиях нагрева, выдержки и литья. В соответствии с алгоритмом изменение режимов работы сводового и подового электронагревателей осуществляется в зависимости от температурного перепада по высоте расплава за счет изменения отношения мощностей P_1/P_2 в диапазоне (0/1÷1/0).

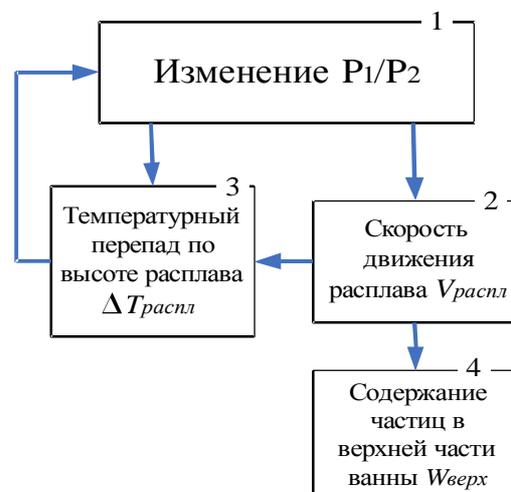


Рисунок 12 – Структурная схема алгоритма управления

Анализ полученных характеристик в режимах работы системы нагрева 1, 2 и 3 показал, что в режиме работы 1, на стадии нагрева, максимум скоростей V_{max} наблюдается в непосредственной близости от поверхности резистивных блоков и на уровне летки скорость не превышает 0,38 м/с, а разогретые массы расплава активно перемещаются от подины к поверхности, вследствие чего температурный перепад $\Delta T_{распл}$ составляет 32 °С (рисунок 13). На стадии выдержки, в режиме работы 2, поле скоростей стабилизируется по всему объему и максимум скоростей V_{max} не превышает 0,001 м/с. При этом имеет место локальный перегрев поверхностных слоев, по причине чего температурный перепад по высоте расплава $\Delta T_{распл}$ достигает максимума равного 65 °С. В режиме работы 3, на стадии литья, поле скоростей устанавливается относительно быстро и в целом оно равномерно. При этом максимальный температурный перепад $\Delta T_{распл}$ не превышает 12 °С, что объясняется выравниванием на уровне 0,25 м от подины тепловых потоков,

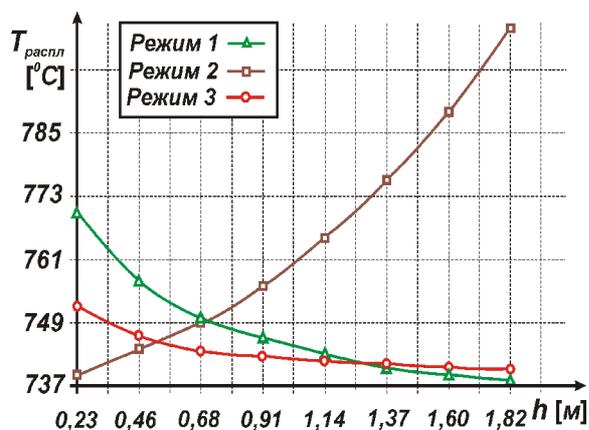


Рисунок 13 – Изменение температуры расплава T по высоте h

которые направлены в расплав от подового и сводового электронагревателей.

Сопоставление полученных значений скоростей и известных результатов, устанавливающих связь между распределением неметаллических включений различного размера в ванне и скоростью движения металла, позволил выявить зависимости возможного распределения неметаллических включений по высоте ванны миксера. На основе анализа значений распределения скоростей в расплаве на стадии нагрева можно предположить, что содержание неметаллических включений в верхней части ванны $W_{верх}$ от общего их количества будет составлять 63 %, 2/3 из которых могут составлять включения

крупного размера, а на стадии выдержки неметаллические включения с относительно высокой плотностью будут сосредотачиваться в области подины. На стадии литья будет наблюдаться снижение содержания неметаллических включений в верхней части ванны $W_{верх}$ от общего их количества до 49 %.

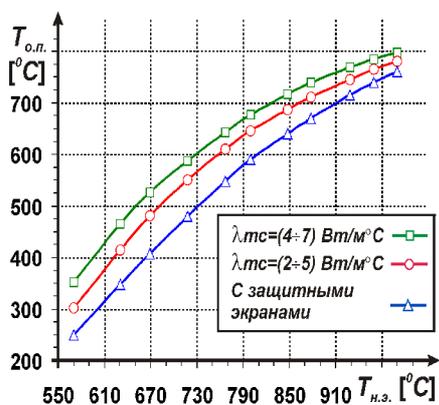


Рисунок 14 – Зависимость температуры поверхности $T_{o.n}$ от температуры элементов $T_{н.э}$

В ходе исследований на математической модели было установлено, что увеличение эффективной площади излучающей поверхности сводового электронагревателя за счет выполнения его в виде монолитного блока и повышение температуры на излучающей поверхности свода $T_{o.n}$ в среднем на 80 °C (рисунок 14) вследствие выполнения излучающей поверхности из корундокарбидокремниевое бетона с коэффициентом теплопроводности $I_{тс}$ равным (4÷7) Вт/м·°C, позволяют в 2 раза повысить тепловую мощность, излучаемую на зеркало металла.

В четвертом разделе оценивается адекватность разработанной математической модели с помощью физической модели и опытно – промышленного образца сводового электронагревателя.

В связи с тем, что сплавы на основе алюминия имеют высокую температуру плавления и обладают повышенной химической агрессивностью, в процессе изготовления промышленных образцов электрических миксеров с алюминиевыми сплавами требуется массивная химически стойкая ограждающая футеровка. Создание такой футеровки значительно увеличивает вес узлов и, соответственно, необходимую мощность и стоимость установки. Ввиду этого, целесообразным является проведение экспериментальных исследований на масштабной физической модели с модельным металлом, обладающим относительно низкой температурой плавления и малой химической активностью. Такая физическая модель была изготовлена при участии автора и использовалась для оценки адекватности математической модели.

На рисунке 15 представлена физическая модель миксера с комбинированным нагревом в масштабе 1:10, сводовый и подовый электронагреватели которой запитаны от источников с частотой питающего напряжения $f=50$ Гц. Физическая модель включает следующие основные узлы: 1 – блок управления системой нагрева; 2 – сводовый электронагреватель; 3 – короткая сеть; 4 – ванна с модельным металлом; 5 – летка и подовый электронагреватель. В качестве модельного металла используется сплав Вуда со свойствами: температура плавления $T_{пл}=79$ °C, электрическое сопротивление $\rho_{м}=43 \times 10^{-8}$ Ом·м, коэффициент теплопроводности $\lambda_{м}=13$ Вт/(м·°C).

Обосновано, что подобие электромагнитных процессов в миксере и физической модели обеспечивается соблюдением равенства относительных электрических сопротивлений $R_{отн}$, а подобие тепловых процессов – равенства тепловых сопротивлений r_i^m :

$$R_{отн0} = \frac{r_{pб0}}{r_{б0} + r_{pб0}} = R_{отнм} = \frac{r_{pбм}}{r_{вм} + r_{pбм}}, \quad r_{i0}^m = \frac{h_{i0}}{I_{i0}} = r_{им}^m = \frac{h_{им}}{I_{им}}, \quad (17)$$

где $R_{отн0}$, $R_{отнм}$ – относительные сопротивления миксера и физической модели соответственно, о.е.; $r_{pб0}$, $r_{pбм}$ – активные сопротивления резистивных блоков, Ом; $r_{б0}$, $r_{вм}$ – активные сопротивления ванны с металлом, Ом; r_{i0}^m и $r_{им}^m$ – тепловые сопротивления i -ых элементов миксера и физической модели соответственно, $(м^2 \cdot ^\circ C)/Вт$; h_{i0} и $h_{им}$ – характерные размеры i -ых элементов, м; λ_{i0} и $\lambda_{им}$ – коэффициенты теплопроводности i -ых элементов, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

На рисунке 16 приведены зависимости изменения температуры расплава $T_{распл}$ от высоты, которые были получены с помощью математической модели и в ходе экспериментов на физической модели. В режиме работы 3 наблюдалось выравнивание температуры по объему расплава и максимальный температурный перепад по высоте расплава $\Delta T_{распл}$ не превышал $1,6^\circ C$ при относительной погрешности измерений $|\epsilon_{рм}|$ не более 19 % и доверительной вероятности $P=95\%$. При этом относительная погрешность $\epsilon_{рм}$:

$$e_{рм} = \frac{T_{распл_изм} - T_{распл_расчет}}{T_{распл_изм}}, \quad (18)$$

где $T_{распл_изм}$ и $T_{распл_расчет}$ – измеренная и рассчитанная температуры, $^\circ C$.

В процессе проведения экспериментов на физической модели была оценена тепловая эффективность сводового электронагревателя, огнеупорный теплопроводный слой которого был выполнен из корундового бетона ($I_{мс}=(2 \div 5) Вт/(м \cdot ^\circ C)$). Относительная погрешность измерений $|\epsilon_{см}|$ температурного перепада в теплопроводном слое модели сводового электронагревателя $\Delta T_{нагр}$ не превышала 9 % при $P=95\%$.

Достоверность математической модели была проверена при сравнении данных математического моделирования и натурального эксперимента на опытно-промышленном образце сводового электронагревателя миксера САМ-5. При измерении температуры на излучающей поверхности относительная погрешность $|\epsilon_c|$ не превышала 6,12 % при доверительной вероятности $P=95\%$.

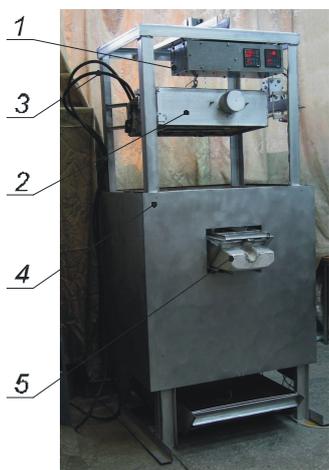


Рисунок 15 – Физическая модель миксера

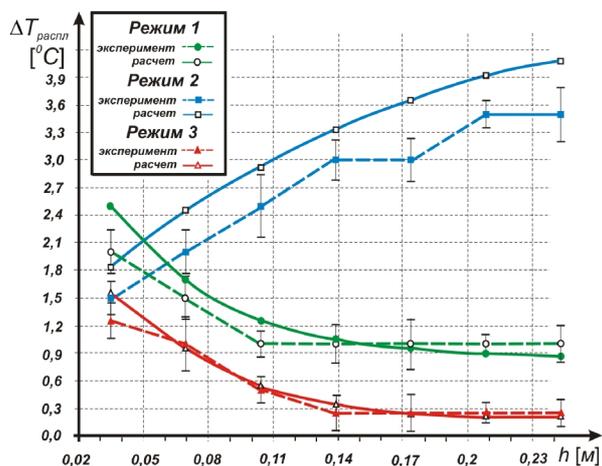


Рисунок 16 – Изменение температурного перепада $\Delta T_{распл}$ по высоте h_m в модели

Высокая степень совпадения результатов математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждает достоверность математической модели опытно – промышленного образца сводового электронагревателя и физической модели миксера. Это позволяет утверждать, что разработанная математическая модель будет адекватно воссоздавать электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы и в промышленном образце миксера с комбинированным нагревом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных задач было установлено, что применение электрического миксера с комбинированным нагревом, оснащенного предложенными подовым и сводовым электронагревателями, позволяет упростить технологический процесс приготовления алюминиевых сплавов, повысить равномерность температурного перепада в расплаве и управлять распределением неметаллических включений в ванне.

Для исследования миксера с комбинированным нагревом расплава была создана численная конечно-элементная математическая модели. Математическая модель позволяет учитывать взаимное влияние электромагнитного, гидродинамического и теплового полей и определять дифференциальные и интегральные характеристики как всего миксера, так и отдельных элементов конструкции при изменении основных параметров электронагревателей, уровня расплава и условий работы миксера. Использование данной математической модели позволяет выявить зависимости изменения электрического КПД, коэффициента мощности и мощности тепловыделения в миксере от характерных параметров электронагревателей и условий их работы, а также зависимости температурного перепада в расплаве и распределения неметаллических включений в ванне, определяющих стабильность и однородность состава приготавливаемого расплава на стадиях нагрева, выдержки и литья.

На основании анализа взаимосвязей изменения распределения неметаллических включений в ванне и температурного поля расплава при изменении соотношения мощностей сводового и подового электронагревателей P_1/P_2 в диапазоне $(0/1 \div 1/0)$, были разработаны принцип управления комбинированным нагревом в электрическом миксере и алгоритм управления режимами работы системы нагрева, который позволяет снижать содержание неметаллических включений в верхней части ванны с 63 % до 49 % от общего их количества и изменять температурный перепад по высоте расплава в пределах от 6,5 °С/м до 38 °С/м за счет перераспределения мощностей подового и сводового электронагревателей в пропорциях 0/1 на стадии нагрева, 1/0 на стадии выдержки и 0,4/0,6 на стадии литья расплава.

В ходе сравнительной оценки данных численных экспериментов и данных, полученных на опытно – промышленном образце и физической модели, подтверждена достоверность разработанной математической модели и ее

пригодность для определения энергетических характеристик электрических миксеров с комбинированным нагревом и оценки качества сплавов.

Установлено, что применение сводового и подового электронагревателей предлагаемых конструкций позволяет повысить энергетический потенциал системы нагрева, использовать устройство в качестве миксера – копильника, устранить зашлаковывание канальной части и бурление в ванне, упростить очистку излучающей поверхности сводового электронагревателя от отложений, а также обуславливает повышение электрического КПД $\eta_{эл}$ и коэффициента мощности $\cos\varphi$ миксера, которые в течение цикла работы устройства достигают значений 0,95 и 0,92 соответственно.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:

1. Темеров, А. А. Исследование качества алюминиевых сплавов, получаемых в миксере с комбинированным нагревом / А. А. Темеров, **Д. А. Михайлов** // Вестник ВГТУ. Воронеж: ВГТУ, 2009. – № 11. – С. 80-84.

2. Михайлов, Д. А. Исследование энергетических характеристик электронагревателя конструкции «горячая» подина / Д. А. Михайлов, А. А. Темеров, Ю. В. Видин // Вестник ВГТУ. Воронеж: ВГТУ, 2010. – № 9. – С. 18-21.

3. Темеров, А. А. Повышение надежности и энергетической эффективности систем нагрева электрических миксеров для приготовления алюминиевых сплавов / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, **Д. А. Михайлов** // Вестник СибГАУ. Красноярск: СибГАУ, 2010. – № 6 (32). – С. 150-154.

4. Темеров, А. А. К вопросу применения систем комбинированного нагрева в электрических миксерах для приготовления алюминиевых сплавов / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, **Д. А. Михайлов** // Вестник СибГАУ. Красноярск: СибГАУ, 2010. – № 6 (32). – С. 155-159.

Патент:

5. Пат. 2371652 РФ, МПК⁷ F 27 В 3/10, F27 D 11/04, H 05 В 3/62. Электрическая печь для приготовления сплавов цветных металлов / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, **Д. А. Михайлов** (РФ). – № 2008105016/02; Заявлено 11.02.08; Оpubл. 27.10.09, Бюл. № 30.

Публикации в прочих изданиях:

6. Темеров, А. А. Электронагреватель для миксера сопротивления / А. А. Темеров, Д. А. Михайлов // Электротехника, электромеханика и электротехнология: Материалы второй научно-технической конференции с международным участием. Новосибирск: НГТУ, 2005. – С. 221-224.

7. Михайлов, Д. А. Электронагреватель нового типа для миксера сопротивления / Д. А. Михайлов, В. В. Гаврилов, А. А. Темеров // Молодежь и наука – третье тысячелетие: Сборник материалов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: КГТУ, 2005. – С. 424-427.

8. Михайлов, Д. А. Исследование распределения температуры в металлическом электроде / Д. А. Михайлов, А. А. Темеров, К. А. Михайлов, А. К. Федюкович // Молодежь и наука – третье тысячелетие: Сборник материалов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: КГТУ, 2006. – С. 435-442.

9. Михайлов, Д. А. Исследование влияния диаметра каналов индукционной единицы на коэффициент мощности ИКП / Д. А. Михайлов, К. А. Михайлов // Молодежь и наука: начало XXI века: Сборник материалов Всероссийской научно - технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: СФУ, 2007. – Ч.4. – С. 162-163.

10. Михайлов, Д. А. Определение тепловой эффективности карбидокремниевых нагревателей, используемых в электротермических устройствах для приготовления алюминиевых сплавов / Д. А. Михайлов, К. А. Михайлов // Молодежь и наука: начало XXI века: Сборник материалов Всероссийской научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: СФУ, 2007. – Ч.1. – С. 247-249.

11. Михайлов, Д. А. Исследование влияния диаметра каналов индукционной единицы на коэффициент мощности ИКП / Д. А. Михайлов, К. А. Михайлов // Молодежь и наука: начало XXI века: Сборник материалов Всероссийской научно - технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: СФУ, 2007. – Ч.1. – С. 235-236.

12. Михайлов, Д. А. Исследование применения высокоогнеупорных материалов в качестве нагревательных элементов / Д. А. Михайлов, К. А. Михайлов, А. А. Темеров // Современные техника и технологии: Материалы XIII международной научно – практической конференции. Томск: ТПУ, 2007. – С. 233-235.

13. Михайлов, Д. А. Повышение надежности конструкции канальной электропечи для получения сплавов на основе алюминия / Д. А. Михайлов, А. А. Темеров, Е. М. Толстихин // Молодежь и наука: начало XXI века: Сборник материалов Всероссийской научно – технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск: СФУ, 2008. – Ч.1. – С. 267-271.

14. Михайлов, Д. А. Применение карбида кремния в качестве подового электронагревателя электрической печи / Е. М. Толстихин, Д. А. Михайлов, А. А. Темеров // Современные техника и технологии: Материалы XIV международной научно – практической конференции. Томск: ТПУ, 2008. – С. 408-410.

Подписано в печать 15.02.2011.

Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 1,2

Тираж 100 экз. Заказ № 3203

Отпечатано:

Полиграфический центр
Библиотечно-издательского комплекса СФУ
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а