

На правах рукописи



ХРИСТИНИЧ АЛЕКСЕЙ РОМАНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПЛАВИЛЬНО - ЛИТЕЙНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ АЛЮМИНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Красноярск - 2010

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Христинич Роман Мирославович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Громыко Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент
Жуков Сергей Павлович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Новосибирский государственный
технический университет» (г. Новосибирск)

Защита состоится 01 октября 2010г. в 14 часов на заседании
диссертационного совета ДМ 212.099.06 при ФГАОУ ВПО «Сибирский
федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск,
ул. Ак. Киренского, 26, ауд. УЛК-115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального
университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г274.

Автореферат разослан 30 августа 2010г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Р. Ю. Царев

Актуальность работы. Стратегией развития отечественных электротехнических комплексов плавления - литейных производств алюминиевой промышленности является увеличение выпуска алюминиевых сплавов. Электрический плавление - литейный агрегат (ЭПЛА) для алюминия является основным комплексным устройством для производства алюминиевых полуфабрикатов, которые используются в дальнейшем переделе для получения высококачественной продукции.

ЭПЛА относится к опасным производственным объектам и для его эксплуатации требуется получение разрешения на применение «Ростехнадзора» Российской Федерации. В связи с этим к нему предъявляются особые требования по надежности, исключающие аварийные ситуации. Надежность такого оборудования определяется следующими свойствами: вероятность безотказной работы, технический ресурс оборудования и его элементов, ремонтпригодность оборудования.

Повышение надежности, эффективности работы и продолжительности сроков эксплуатации ЭПЛА снижает затраты на ремонты и во много раз уменьшает экономические потери от простоя оборудования. Выявление и устранение причин потери способности отдельных узлов и систем ЭПЛА в целом выполнять заданные технологические функции является важной задачей в решении проблемы повышения надежности и эффективности оборудования.

Основные положения диссертационной работы разрабатывались в рамках проекта №2.1.2/3995 “Развитие теоретических основ технологии приготовления высококачественных алюминиевых сплавов посредством воздействия на расплав сильным электромагнитным полем” аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2010 годы)», подраздел 2.1.2 «Проведение фундаментальных исследований в области технических наук».

Вопросам надежного функционирования и эффективной эксплуатации ЭПЛА посвящены работы А. Д. Свенчанского, А. П. Альтгаузена, В. М. Гребеника, В. И. Гриневича и других ученых. Большой вклад в исследование эффективного функционирования ЭПЛА внесли В. Н. Тимофеев, Р. М. Христинич, А. А. Темеров, П. А. Хоменков, Е. А. Павлов. Известные работы не содержат готовых методик, позволяющих учесть комплексное влияние функционально не связанных параметров во времени на надежное функционирование ЭПЛА.

Таким образом, обеспечение надежного и эффективного функционирования ЭПЛА при эксплуатации, оценка надежности на стадии проектирования и разработка методики расчета его надежности являются актуальными задачами.

Цель диссертационной работы - исследование работоспособности, прогнозирование состояния, создание математической модели надежности, учитывающей взаимосвязи электрических, геометрических, технологических особенностей узлов и систем и разработка технических решений для

повышения эффективности работы электрического плавильно - литейного агрегата.

Объект исследования – электрический плавильно - литейный агрегат для получения алюминиевых сплавов.

Предмет исследования – надежность и эффективность электрического плавильно - литейного агрегата.

Задачи исследования:

1. Провести анализ конструктивных особенностей, современных методов и способов диагностики электрического плавильно - литейного агрегата для алюминия и исследовать факторы, влияющие на работоспособность узлов и систем ЭПЛА для алюминия.

2. Построить математическую модель надежности узлов и систем ЭПЛА, учитывающую взаимосвязи его электрических, геометрических, технологических особенностей на различных этапах его жизненного цикла.

3. Создать алгоритмы, программы и методику диагностики и прогнозирования надежности ЭПЛА для алюминия.

4. Разработать практические рекомендации по повышению надежности и эффективности ЭПЛА.

Методы исследования. Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики с использованием методов теории электромагнитного, теплового и гидродинамического полей, математической статистики, нейросетевого моделирования, методов параметрической оптимизации, методов электротехники и теплотехники. При разработке математических моделей и программ использован алгоритмический язык FORTRAN 90, пакеты программ ANSYS Multiphysics и ANSYS CFX.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Научно обоснованная новая конструкция электрического миксера сопротивления повышенной надежности и эффективности с расположением нагревателей в футеровке подины ванны миксера, обеспечивающая выравнивание температуры по объему расплава на основе прямой теплопередачи.

2. Математическая модель и методика прогнозирования показателей надежности - средней наработки до отказа, вероятности безотказной работы, интенсивности отказов электрического плавильно – литейного агрегата, учитывающая комплексное взаимодействие электрических, геометрических и технологических особенностей его узлов и систем на различных этапах жизненного цикла.

3. Электромагнитный перемешиватель жидкой сердцевины непрерывно литых цилиндрических алюминиевых слитков, обеспечивающий интенсификацию тепломассообменных процессов в слитке при его кристаллизации.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Впервые предложена математическая модель надежности электрического плавильно – литейного агрегата, позволяющая одновременно

учитывать взаимосвязи электрических, геометрических и технологических параметров.

2. Установлены зависимости энергетической эффективности электрического плавно - литейного агрегата для алюминия от надежности его узлов в различных режимах работы.

3. Выявлены нелинейные зависимости распределения магнитной индукции, электромагнитных сил и скоростей в рабочем теле - жидкой сердцевине алюминиевого непрерывно литого цилиндрического слитка от частоты питающего напряжения электромагнитного перемешивателя.

4. Предложены и формализованы показатели надежности - средняя наработка до отказа, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, позволяющие оценить жизненный цикл узлов электрического плавно - литейного агрегата для алюминия.

Значение для теории. Развита теоретическая основа надежности, учитывающая комплексное влияние технических и технологических параметров на эффективное функционирование электрического плавно - литейного агрегата для алюминия на различных этапах его жизненного цикла.

Практическая значимость работы:

1. Разработана новая конструкция электрического миксера сопротивления повышенной надежности с расположением нагревателей в футеровке подины ванны миксера, обеспечивающая выравнивание температуры по объему расплава на основе прямой теплопередачи.

2. Создан программный комплекс «Энергопро-Надежность» для анализа состояния, диагностики и прогнозирования надежности электрического плавно - литейного агрегата, позволяющий предсказать жизненный цикл его узлов.

3. Обоснованы практические рекомендации по повышению надежности электрического плавно - литейного агрегата, что позволяет перейти к текущей функциональной диагностике и уменьшить количество и продолжительность плановых предупредительных ремонтов.

4. Разработан электромагнитный перемешиватель жидкой сердцевины непрерывно литой цилиндрической алюминиевой заготовки, обеспечивающий эффективное перемешивание слоев жидкой фазы расплава слитка.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на физической модели и действующем промышленном оборудовании.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты обсуждались и были одобрены на следующих конференциях:

1. Второй Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (г. Тольятти, 2007г.).

2. 3-й и 4-й научно-технических конференциях с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (г. Новосибирск, 2007г., 2009г.).

3. Шестой международной научно-технической конференции «Эффективность и качество электроснабжения промышленных объектов» (г. Мариуполь, 2008г.).

4. 15-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Томск, 2009г.).

5. Международном научно-техническом конгрессе «Энергетика в глобальном мире» (г. Красноярск, 2010г.).

Использование результатов работы. Результаты исследований диссертационной работы используются для определения срока безаварийной эксплуатации систем электроснабжения электротехнических комплексов при проектировании металлургических предприятий, а также при прогнозировании надежности электрометаллургического оборудования в исследовательском центре ОАО «Сибцветметниипроект». Результаты работы внедрены в учебном процессе ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» для обучения студентов специальности 140605 «Электротехнологические установки и системы» и используются при чтении лекций, проведении практических занятий, выполнении курсовых работ и дипломных проектов. Использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в изданиях по перечню ВАК, 10 публикаций в других изданиях, в том числе в межвузовских сборниках научных трудов, сборниках международных и всероссийских конференций и семинаров.

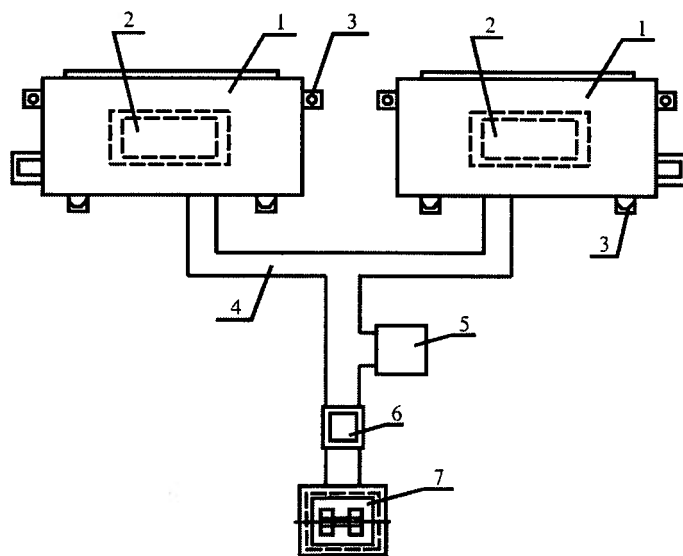
Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, выполнена на 178 страницах, содержит 58 рисунков, 16 таблиц, список использованных источников из 102 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, указаны цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверности полученных результатов.

В первой главе рассмотрены особенности электротехнического комплекса плавления - литейного агрегата для алюминия, который включает: силовые питающие трансформаторы, линию силового электроснабжения, систему автоматики, систему электронагрева с тиристорными регуляторами напряжения, гидравлическую и пневматическую системы, устройства для очистки расплава от механических и химических примесей, литейную систему.

Электрический плавильно - литейный агрегат может быть реализован по двухкаскадной или однокаскадной схеме. В последней, рисунок 1, технологический процесс получения полуфабрикатов из алюминиевых сплавов осуществляется следующим образом: в миксере 1 на основе жидкого алюминия осуществляется приготовление сплава с заданными параметрами по физико-химическим свойствам; для интенсификации тепловых и химических процессов в расплаве применяется электромагнитный перемешиватель 2; с помощью системы, состоящей из подъемного устройства 3 и металлотракта 4, приготовленный расплав поступает через установку рафинирования 5 и установку фильтрации 6 в кристаллизаторы литейной машины 7, где происходит формирование слитков.



Надежность ЭПЛА зависит как от надежности отдельных узлов, так и от взаимного влияния узлов и механизмов друг на друга. Создание и использование математических моделей прогнозирования повреждений узлов и систем электрометаллургического оборудования является одним из перспективных направлений решения задач повышения его надежности на всех этапах существования - проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации.

Анализ эксплуатации ЭПЛА позволил сделать вывод о целесообразности исследования в следующих направлениях:

- изучение технологических процессов и особенностей работы ЭПЛА, приводящих к зарождению, развитию и достижению критического уровня повреждения узлов и систем оборудования;
- разработка модели надежности оборудования на стадии эксплуатации, что обеспечит решение ряда задач, таких как: обоснование оптимальной долговечности узлов оборудования, снижение энергоемкости оборудования, повышение производительности узлов и агрегатов;
- применение математической модели прогнозирования повреждений является отправной точкой в решении задач исследовательского, технологического и технико-экономического направлений, связанных с повышением надежности работы оборудования и обеспечением непрерывности технологического процесса;
- разработка новых систем и устройств электромагнитного воздействия на расплав с целью повышения надежности и эффективности существующего и разработки более прогрессивного электрометаллургического оборудования для получения качественных алюминиевых полуфабрикатов.

Во второй главе проведен анализ работоспособности элементов электротехнического комплекса плавились – литейного агрегата, определены узлы, наиболее подверженные износу и выходу из строя, произведен выбор расчетных моделей и разработана математическая модель надежности узлов ЭПЛА.

Характеристики надежности ЭПЛА могут быть определены следующим образом. Представив суммарную длительность режима j -го вида в течение расчетного периода времени t_p

$$\sum_{i=1}^{n_j(t_p)} t_{ji} = J, \quad (1)$$

где $n_j(t_p)$ - число реализаций режима j за время t_p , получим оценку эффективности запланированного использования агрегата или узла в виде коэффициента планового применения

$$K_{ПП} = 1 - (M + O + R)/(U + B) = 1 - q_{ПЛ}, \quad (2)$$

где $q_{ПЛ}$ - коэффициент планового простоя.

Для оценки степени надежной эксплуатации ЭПЛА при возникновении внеплановых режимов применим выражение коэффициента готовности

$$K_G = \frac{U - M}{U + B - M - O - R} = \frac{1 + N + C + S}{1 + N + C + S + A + F + W}. \quad (3)$$

Для комплексной оценки эффективности использования объекта применяется коэффициент технического использования

$$K_{ТИ} = \frac{I + N + C + S}{U + B} = 1 - q_{ПЛ} - q_{AB} = K_G K_{ПП}, \quad (4)$$

где $q_{AB} = (A + F + W)/(1 - q_{ПЛ})$ - коэффициент аварийного простоя. Тогда $K_G = 1 - q_{AB}/(1 - q_{ПЛ})$.

Здесь U - подмножество режимов использования: M - техническое обслуживание, I - пуск, N - нормальная работа, C - регулирование, S - остановка; B - подмножество режимов простоя: A - при авариях, F - в неработоспособном состоянии, W - в период послеаварийного восстановления, R - в период ремонтов, O - в работоспособном состоянии. Формирование множества событий V изменения состояний ЭПЛА может описываться выражением $V = J \times D \times G \times P$, где D - подмножество возмущений, G - вынужденных действий при автоматическом регулировании, P - преднамеренных действий эксплуатационного и ремонтного персонала. В свою очередь, $D = A' \cup F'$, $G = C' \cup S' \cup I'$, $P = M' \cup R' \cup W'$. Здесь символы со штрихами обозначают события начала и окончания режима.

Прогнозирование надежности, например электрических нагревателей, силового питающего трансформатора, а в конечном итоге - возможного времени их безотказной работы является важным для безаварийной эксплуатации ЭПЛА. Это позволяет эксплуатационному и ремонтному персоналу вносить оперативные изменения в режим работы ЭПЛА, направленные на предотвращение аварийных ситуаций.

Ввиду сложности учета всех особенностей электрических нагревателей, свойств загружаемых в миксер материалов, многообразия условий эксплуатации миксера при решении задачи анализа надежности нагревателей и задачи синтеза для определения параметров их эффективной эксплуатации используются следующие допущения: несущественные изменения в конструкции электрического нагревателя; выход нагревателя по причинам внешнего воздействия; преднамеренное нарушение условий эксплуатации и технологических условий ведения плавки; сбой в системе управления электрическим миксером или в системе питания электрического нагревателя.

Для решения означенных задач может успешно использоваться одна из многих модификаций искусственной нейронной сети (ИНС) – конфигурация ИНС прямого распространения с обучением по методу обратного распространения ошибки. Такая ИНС представляет собой многослойный персептрон, во входном слое которого находится, например, 5 нейронов, в скрытом - 6 нейронов, в выходном – один нейрон. Для обучения ИНС используется алгоритм обратного распространения ошибки совместно с генетическим алгоритмом (ГА), представленный на рисунке 2.

В данном алгоритме использована одна из наиболее распространенных функций - нелинейная функция активации с насыщением (логистическая функция или сигмоид)

$$F(S) = 1 / (1 + e^{-as}). \quad (5)$$

Для ускорения обучения в нашем случае приняты: коэффициент скорости обучения $KSO = 0,85$; момент ускорения обучения $LMOM = 0,9$. Число генераций ГА не превышает 40.

Для каждого тренируемого образца вычисление ошибки выполняется по формуле

$$EP = 0,5(DH - OK)^2, \quad (6)$$

где DH - заданное значение; OK - расчетное значение. Точность обучения ИНС определялась при помощи суммарной ошибки, которая по заданию не превышала $\varepsilon = 10^{-6}$.

Одним из факторов, влияющих на точность прогнозирования параметров является нормирование входных данных. При использовании логистической активационной функции необходимо, чтобы каждое значение, подаваемое на вход ИНС, находилось в интервале от 0 до 1.

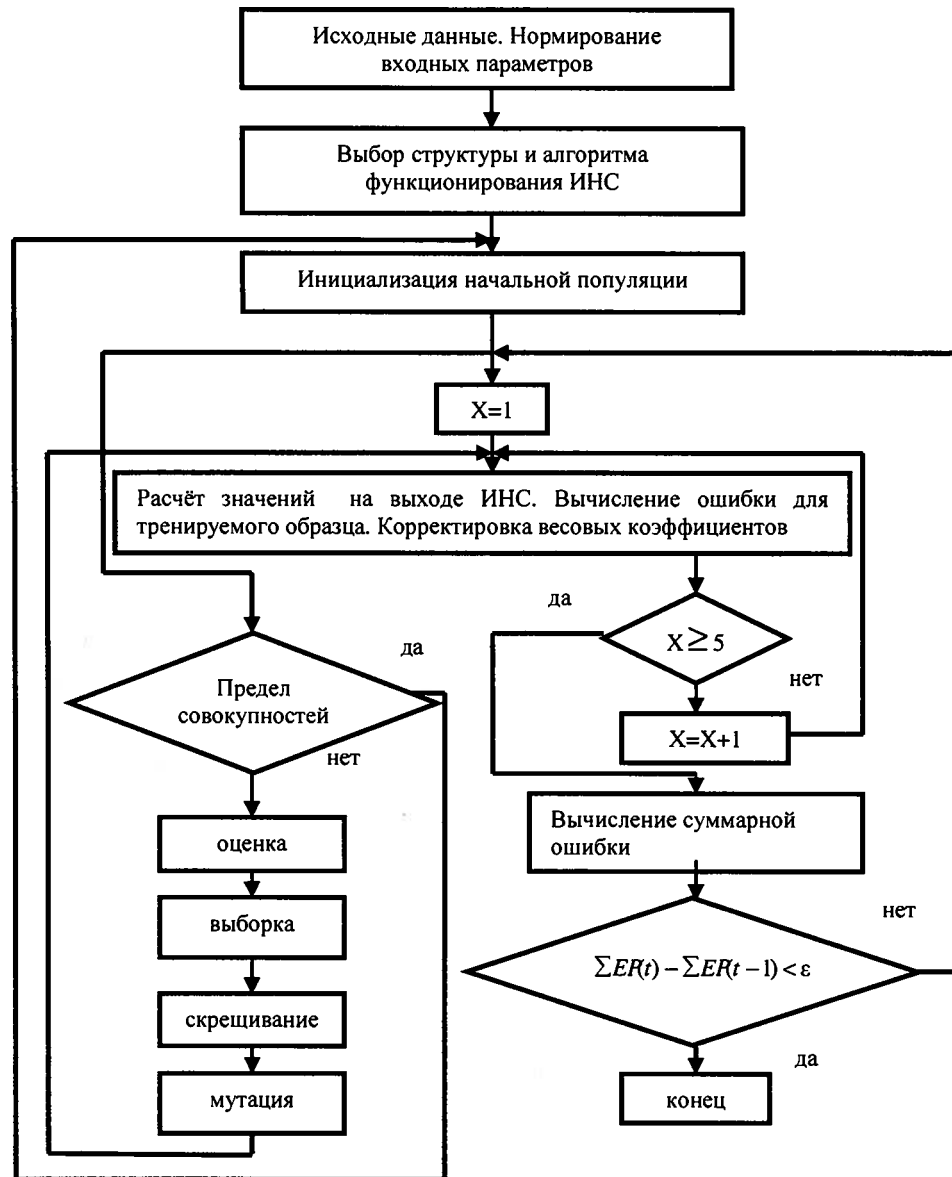


Рисунок 2- Алгоритм функционирования ИНС

Наиболее приемлемым для нормирования исходных данных, в нашем случае, является выражение, представленное формулой

$$P_i'' = P_i / K, \quad (7)$$

где K должно принимать значения для удовлетворения неравенства $P_i < K$.

Применение математической модели на основе ИНС совместно с ГА позволяет определять надежность узлов ЭПЛА при наличии функционально несвязанных факторов: решать прямую и обратную задачи надежности, а также выполнять корректировку фиксированных заданий в режиме реального времени для управления параметрами ЭПЛА.

В третьей главе систематизированы исходные данные, сформулированы основные допущения и представлена постановка задачи для

расчета электромагнитного, теплового и гидродинамического полей с учетом внутренних и внешних технико-физических факторов в электрическом миксере сопротивления.

Для обобщенного анализа должна решаться главная задача математического параметрического моделирования – определение характеристик ведения технологического процесса и расчет параметров для повышения надежности и эффективности ЭПЛА. Основными блоками рассматриваемой задачи являются: электрический миксер с расплавом алюминия; система нагревателей, расположенных под сводом или в футеровке подины; индуктор электромагнитного перемешивателя, расположенный под подиной миксера или с боковой стороны; твердая или жидкая шихта, расположенная на подине миксера. Представленная обобщенная задача может быть разделена на следующие связанные подзадачи: **электромагнитную, тепловую и гидродинамическую.**

Важным для повышения надежности электрического миксера является изменение теплового поля и, в частности, температуры во внутреннем пространстве миксера в различных переходных тепловых режимах. Можно выделить два основных переходных режима: при установившейся температуре внутреннего пространства расплава 1 происходит открывание двери рабочего окна, через которое поступает холодный воздух или производится загрузка твердой шихты 2 в миксер (печь) (рисунок 3).

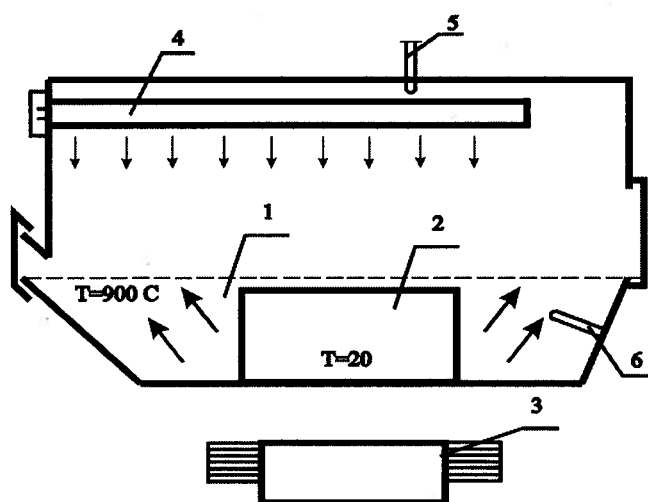


Рисунок 3 – Эскиз миксера с шихтой

Под миксером расположен электромагнитный перемешиватель 3 для интенсификации тепломассообменных процессов в расплаве.

В номинальном режиме работы электрического миксера нагревание внутреннего пространства происходит, в основном, посредством излучения нагревателями 4 и контролируется термодатчиком 5. Средняя температура в рабочем пространстве миксера составляет 850°C.

Снижение температуры в рабочем пространстве миксера может быть также обусловлено загрузкой твердой шихты с температурой 20 °C и менее. В этом случае управляющая термopapa 6, которая расположена в ванне миксера, выдает сигнал на контроллер для увеличения тока нагревателей, которые начинают работать на максимальную мощность. Это приводит к тому, что температура вокруг нагревательного элемента нагревателя начинает интенсивно подниматься, например до 1100 -1150 °C, что вызывает его перегрев и интенсивный износ нагревателя и защитного кожуха, в то время как температура в области ограничивающего термодатчика 5 находится в допустимом диапазоне.

Нестационарное тепловое поле в расчетной области внутреннего пространства миксера с учетом сторонних источников теплоты описывается уравнением

$$\rho c \frac{\partial(T)}{\partial t} + \rho c T \operatorname{div}(U) = \lambda \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) + Q, \quad (8)$$

где ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; U - вектор скорости, $\text{м}/\text{с}$; c - удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; T - температура, $^\circ\text{C}$; λ - теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; Q - сторонние источники теплоты, Вт . В футеровке миксера происходит теплообмен при помощи теплопроводности, процесс которого описывается уравнением без учета конвекции

$$\rho c \frac{\partial(T)}{\partial t} = \lambda \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} T). \quad (9)$$

В области воздушного пространства внутри миксера, а также в области пространства снаружи вокруг миксера и в алюминиевом расплаве происходит теплообмен за счет конвекции, процесс которого описывается уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial t} + W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (10)$$

Теплопередача излучением во внутреннем пространстве миксера, в том числе между поверхностями нагревателей, поверхностями боковых стен и поверхностью шлакового слоя расплава описывается с помощью уравнения радиационного переноса

$$s \frac{\partial I}{\partial r} = -(K_a + K_s) I, \quad I = I_0 e^{-(K_a + K_s) S}. \quad (11)$$

При загрузке твердой шихты при температуре 20°C наблюдается снижение рабочей температуры в пространстве миксера (рисунок 4: 1 - температура нагретого миксера; 2 - температура в миксере с нагретым слитком; 3 - температура в миксере с холодным слитком), что приводит к увеличению температуры нагревателей, например до 1100°C .



Рисунок 4 – Распределение температуры внутри миксера

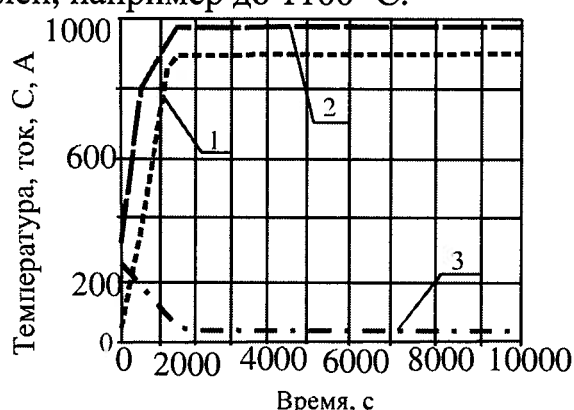


Рисунок 5 – Изменение температуры нагревателя

Для исключения перегрева нагревательного элемента и внутренней поверхности кожуха нагревателя, необходимо в процессе регулирования разогрева нагревателя уменьшать ток в нагревателе (рисунок 5), введя

коэффициент $K_D = \exp((t_n - t_e)/t_n)$, где t_e , t_n - температура внутри и снаружи нагревателя. На рисунке 5 показано: 1 - температура вокруг кожуха нагревателя; 2- температура нагревательного элемента; 3 - изменение тока нагревателя. Используя рисунок 3 можно реализовать расчетную модель для исследования изменения температуры в рабочем пространстве миксера при наличии расплава в ванне миксера и загрузки твердой шихты в расплав.

При этом могут реализовываться два технологических режима: при естественном нагревании твердой шихты до температуры расплава; при интенсификации тепломассообменных процессов при помощи индуктора электромагнитного перемешивателя 3. Для реализации расчетной модели переменное электромагнитное поле в области «индуктор-расплав» описывается уравнениями

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma(\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})) + \varepsilon_a \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_a \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \operatorname{div} \vec{B} = 0, \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_a} \quad (12)$$

и реализуется в программном комплексе ANSYS.

В модели, реализованной в среде ANSYS, нестационарное гидродинамическое поле в области расплава описывается системой уравнений для движения среды в трехмерных координатах (представлено одно уравнение)

$$\rho \frac{\partial(U)}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div}(Uu) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} U) + \left[-\rho \frac{\partial(u'^2)}{\partial x} - \rho \frac{\partial(u'v')}{\partial y} - \rho \frac{\partial(u'w')}{\partial z} \right] + F_{Lx}, \quad (13)$$

включая уравнение неразрывности $\rho \cdot \operatorname{div}(u) = 0$ и уравнения $k-\varepsilon$ модели турбулентности

$$\rho \frac{\partial(k)}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div}(ku) = \operatorname{div} \left[\frac{\eta_t}{\sigma_k} \operatorname{grad}(k) \right] + 2\eta_t (E_{ij})^2 - \rho \varepsilon, \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial(\varepsilon)}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div}(\varepsilon u) = \operatorname{div} \left[\frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad}(\varepsilon) \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\eta_t (E_{ij})^2 - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (15)$$

Совмещенные численно-математические модели позволяют провести анализ электромагнитных полей в алюминиевом расплаве электрического миксера, а также гидродинамических и тепловых полей с учетом технологических особенностей агрегата и определить эффективность комплексной работы системы электронагрева и электромагнитного перемешивания расплава.

В четвертой главе представлен расчет надежности узлов электрического плавильно - литейного агрегата, а также проведен анализ предложенных технических решений для повышения эффективности ЭПЛА.

Исследование изменения параметров силового питающего трансформатора при помощи математической модели надежности на основе ИНС с ГА позволило, с упреждением до одного года, определить сопротивление изоляции и диэлектрические потери обмотки, а также величину пробивного напряжения трансформаторного масла с погрешностью, не превышающей 7%.

Используя методику определения надежности узлов ЭПЛА, представленную в главе 2, определено число погашений узлов и систем ЭПЛА и выявлено, что наименее надежными являются нагреватели с величиной погашений 11,25, что составляет более 80% всех отказов ЭПЛА. Поэтому в область исследования были включены электрические нагреватели миксеров сопротивления, для которых были определены допустимые параметры при продолжительной их эксплуатации: номинальная мощность нагревателя - 73 кВт; допустимая температура воздушного пространства вокруг нагревателей - 850 °С; допустимая температура жидкого металла - 850 °С; максимальный ток в цепи питания нагревателей - 350 А; период эксплуатации - 2 года и другие параметры.

После проведения обучения и тестирования ИНС с выбранными образцами, максимальная ошибка не превысила 2,0%. При прогнозировании величины срока службы нагревателей с учетом полученных весовых коэффициентов максимальная погрешность составила 3,6- 8,6%.

Совокупное изменение технико-технологических параметров электрического миксера, например, величины тока нагревателя, температуры воздуха вокруг нагревателя, температуры металла в миксере приводит к сложному закону изменения срока службы нагревателя, представленному в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение срока службы нагревателя

$\tau_1(100)$, дни	36	31	26	21	16	11	6	1
$\tau_2(240)$, дни	105	110	115	120	125	130	135	140
$t_{мет}$, °С	700	710	715	720	725	730	735	740
$t_{возд}$, °С	740	760	780	800	820	840	860	860
$\sum \tau$, дни	400	348	292	252	226	208	198	200

Результаты исследований надежности нагревателей подтверждают сложный характер зависимости срока службы от совокупности изменяющихся параметров, которые оказывают взаимное влияние друг на друга и на нагреватели.

Расположение нагревателей в подсводовом пространстве электрического миксера или печи в классическом исполнении, во многом обусловлено специфической конструкцией нагревателей и низкой надежностью футеровочных материалов подины миксера.

В отношении надежности и эффективности такая конструкция электрического миксера имеет существенные недостатки: увеличенный объем внутреннего пространства из-за расположения нагревателей; увеличенные тепловые потери; перегрев нагревателей и рабочего пространства миксера; нагрев расплава в миксере только при помощи одного вида теплопередачи – излучения, что приводит к перегреву верхних слоев расплава и охлаждению нижних слоев и требует выравнивания температуры расплава путем внешнего воздействия – перемешивания и т.д.

В основу новой конструкции электрического миксера (рисунок 6) принят фактор повышения тепловой эффективности нагрева шихты в миксере за счет использования прямой теплопередачи между нагревателями 1, установленными в огнеупорном слое футеровки 2 подины ванны и расплавом, а также путем увеличения конвективной теплопередачи в самом металле, находящемся в ванне миксера.

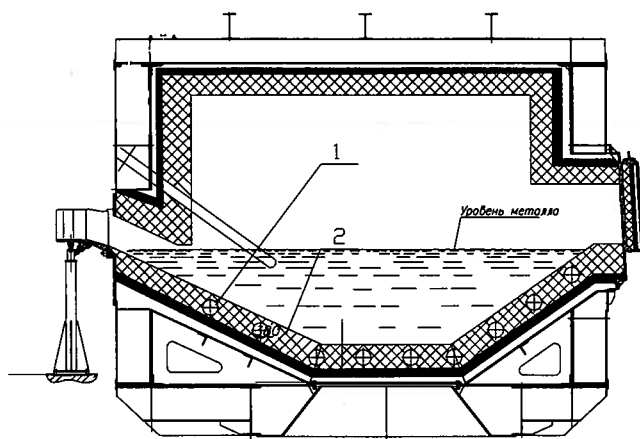


Рисунок 6 – Миксер с нагревателями в футеровке подины



Рисунок 7 – Распределение температуры по высоте миксера

График распределения температуры в миксере от свода к подине по вертикали представлен на рисунке 7 (1- нагреватели в огнеупорном слое подины; 2 – нагреватели под сводом). Такие изменения конструкции миксера и его тепловых режимов позволяют достичь снижения потерь мощности на 26 %, повысить энергоэффективность электрического миксера и надежность нагревателей за счет снижения их температуры.

На эффективность работы ЭПЛА и качество алюминиевых полуфабрикатов при литье оказывают влияние такие факторы как температура расплава, скорость литья, интенсивность охлаждения кристаллизатора и слитка, наличие модифицирующих добавок.

Совокупность означенных факторов, влияние их друг на друга, приводит к неконтролируемому протеканию процесса кристаллизации слитка и снижению его качества. Кроме того, в процессе неконтролируемой кристаллизации, алюминиевый слиток может быть подвержен различным дефектам технического характера - ликвационным наплывам, трещинам, неслитинам, порам, ликвации и т.п.

Цилиндрический слиток из алюминиевого сплава высокого качества может быть получен литьем в кристаллизатор с электромагнитным перемешиванием затвердевающего расплава на литейной машине стандартной конструкции. Схема процесса полунепрерывного литья цилиндрических алюминиевых слитков для последующего передела с применением электромагнитного перемешивателя показана на рисунке 8.



Рисунок 8 – Схема полунепрерывного литья слитков

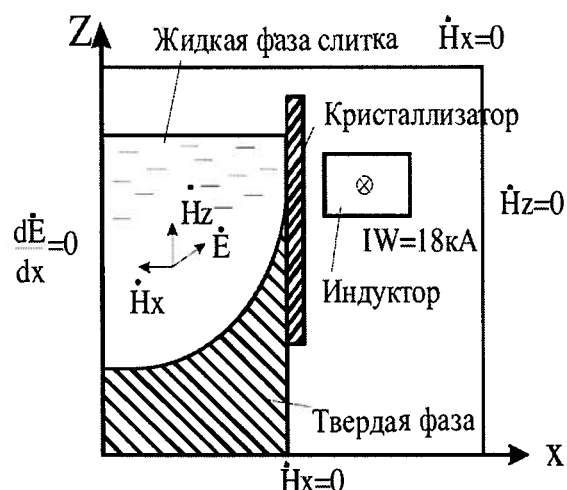


Рисунок 9 - Расчетная модель системы «индуктор- слиток»

Исследование траекторий перемещения расплава и определение скоростей движения расплава в области жидкой фазы слитка проводились с использованием численно - математической модели системы «индуктор- слиток» (рисунок 9), которая реализована в программном комплексе ANSYS. Основные уравнения для решения такой задачи представлены в главе 3.

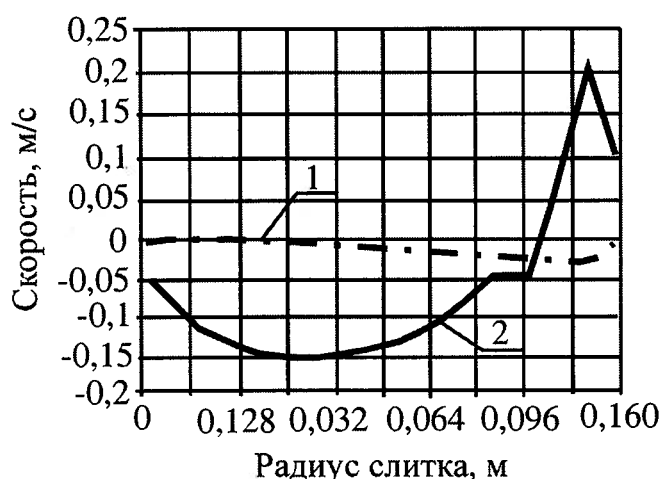


Рисунок 10 – Распределение скоростей по радиусу слитка

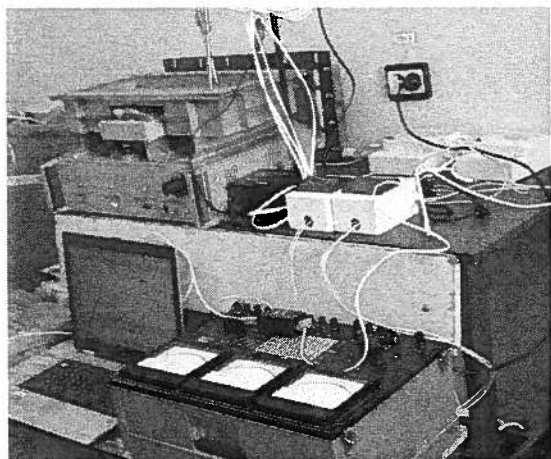
На рисунке 10 представлено распределение скоростей по радиусу жидкой фазы слитка при $IW=18$ кА и частоте питающего индуктора напряжения, равной 2,5 герца (1 – радиальная составляющая скорости; 2 – аксиальная составляющая скорости).

Центр основного контура циркуляции расположен в нижней части жидкой фазы слитка, а направление движения расплава осуществляется против часовой стрелки. Максимальных значений скорость достигает в вертикальном направлении $V_y=0,15-0,2$ м/с, что характеризует теплообмен между слоями расплава вдоль стенки кристаллизатора и осевыми слоями. Ниже и выше означенного сечения будут преобладать скорости V_x , которые определяются инерционным течением расплава и формой кристаллизатора. С уменьшением частоты питающего напряжения область циркуляции расплава расширяется. Окончательные рекомендации для выбора скорости перемешивания определяются в процессе отработки технологии литья слитков с применением ЭМП на промышленном агрегате.

В пятой главе рассмотрены результаты исследований качества функционирования в различных режимах электрического миксера

сопротивления на физической модели и представлен сравнительный анализ экспериментальных исследований и результатов теоретических расчетов.

Физическая модель миксера с индуктором электромагнитного перемешивания в масштабе 1:15 совместно с измерительным комплексом представлена на рисунке 11. Модель состоит из ванны, изготовленной из немагнитной стали толщиной 0,5 мм и заполненной моделирующим металлом - галлием. Ванна установлена в металлокаркас, во врезке которого



расположен двухфазный индуктор бегущего электромагнитного поля. Под ванной установлены электрические нагреватели, обеспечивающие нагрев моделирующего металла путем прямой теплопередачи. Под сводом миксера-модели установлены нагреватели, моделирующие нагрев миксера в классическом исполнении.

Рисунок 11 – Физическая модель миксера ЭПЛА

Измерения распределения температуры в пространстве миксера – модели проводились на расстоянии 3 и 53 мм от подины ванны, которые выявили, что перепад температуры в незаполненной металлом ванне модели, при нагреве со стороны подины, не превышает 2 - 3⁰С. При нагреве со стороны свода перепад температуры в контрольных точках составил 6 - 7⁰С.

Исследования изменения градиента температуры в процессе нагрева моделирующего металла в миксере – модели показали, что при нагреве со стороны ванны перепад температур по высоте столба металла 50 мм не превышает 4 - 5⁰С (рисунок 12: кривая 3 – низ расплава, кривая 4 – верх расплава); при нагреве расплава со стороны свода миксера – модели перепад температур составил 10 - 12⁰С по высоте расплава (рисунок 12: кривая 1 – верх расплава, кривая 2 – низ расплава).

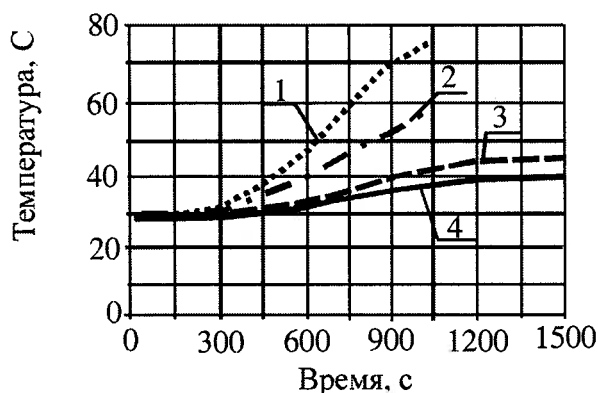


Рисунок 12 – Изменение температуры расплава при нагреве со стороны свода и подины

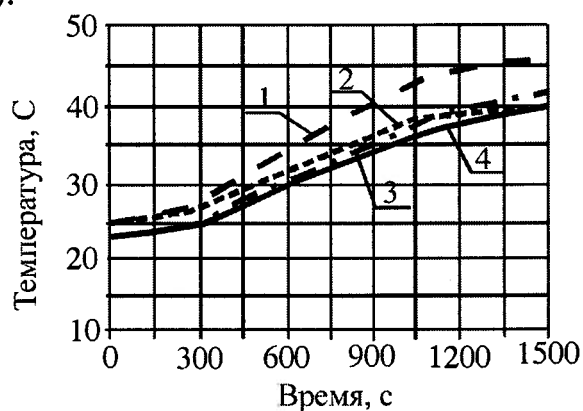


Рисунок 13 – Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных

Исследования на модели показали, что затраты энергии на нагрев одинакового объема расплава при расположении нагревателей со стороны

подины в 2,5 раза меньше, чем при расположении нагревателей под сводом модели.

В работе выполнен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов в программно-вычислительном комплексе ANSYS процесса нагрева воздушной среды (рисунок 13: кривая 3- температура внизу, 4 – температура сверху) и расплава в миксере – модели (рисунок 13: кривая 1 – температура внизу; кривая 2 – температура сверху) при нагреве снизу. Сравнивая соответствующие кривые рисунков 12 и 13 видно, что величина погрешности не превышает 8-10%, что подтверждает хорошую настройку расчетной модели.

В разделе экспериментально доказано и подтверждено расчетами, что расположение нагревателей со стороны подины ванны электрического миксера повышает эффективность нагрева жидкой (твердой) шихты, приводит к выравниванию температуры по высоте и объему расплава, интенсифицирует теплообмен между слоями расплава и уменьшает необходимость использования перемешивателей расплава в миксере, а также повышает надежность нагревателей за счет прямой теплопередачи между нагревателями, футеровкой и расплавом.

В заключении изложены выводы, отражающие результаты диссертационной работы.

В приложении представлены материалы по использованию результатов диссертационной работы в промышленности и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены исследования работоспособности и качества функционирования электрического плавильно - литейного агрегата для алюминия при внешних воздействиях и выявлено, что надежность ЭПЛА зависит как от надежности отдельных узлов, так и от взаимного влияния узлов, технологических особенностей и механизмов друг на друга.

2. Разработана математическая модель надежности узлов ЭПЛА на основе искусственных нейронных сетей и генетического алгоритма, реализованная в виде программы «Энергопро-Надежность», позволяющая планировать срок службы его узлов при наличии функционально несвязанных факторов: решать прямую и обратную задачи надежности.

3. Сформулированы основные допущения, представлены постановки задач и реализованы решения для расчета электромагнитного, теплового и гидродинамического полей с учетом внутренних и внешних технико-технологических факторов в электрическом миксере сопротивления для определения параметров, обеспечивающих его надежную и эффективную эксплуатацию.

4. Выполнены расчеты надежности элементов и систем электрического плавильно - литейного агрегата: число предполагаемых отказов и длительность безотказной работы нагревателей, величина погашений

распределительной электрической секции ЭПЛА и выявлены предполагаемые изменения в техническом состоянии силового питающего трансформатора, погрешность вычислений не превышает 6-8%.

5. Предложена новая конструкция электрического миксера с расположением нагревателей со стороны подины ванны миксера, которая позволяет на 20-30 % уменьшить тепловые потери миксера, увеличить эффективность нагрева расплава в ванне миксера и повысить надежность нагревателей и ЭПЛА в целом.

6. Разработан электромагнитный перемешиватель жидкой сердцевины непрерывно литого цилиндрического алюминиевого слитка и его математическая модель для исследования электрогидродинамических параметров системы «индуктор-слиток». Результаты решения модели позволили определить диапазон эффективной скорости для интенсификации тепломассообменных процессов, которая находится в интервале от 0,15 до 0,2 м/с.

7. Выполнен сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов надежности узлов ЭПЛА, а также процесса нагрева расплава в миксере – модели и показано, что погрешность не превышает 8-10%.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

- по перечню ВАК:

1. **Христинич, А. Р.** Повышение эффективности электрического плавно-литейного агрегата / А. Р. Христинич // Вестник ВГТУ, том 6. Воронеж: ВГТУ, 2009. – №2. - С.124-129.

2. **Христинич, А. Р.** Прогнозирование надежности электрического плавно-литейного агрегата / А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич// Электротехника, 2009. –№ 7. - С. 47-52.

3. **Христинич, А. Р.** Планирование электропотребления абонентов жилых массивов на основе нейрогенезисных технологий / А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич// Известия вузов. Электромеханика, 2008. – № 5. - С. 52-58.

4. **Христинич, А. Р.** Комплексная диагностика маслонеполненных трансформаторов/А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич// Вестник КрасГАУ. Вып. 18, 2007. – № 3. - С. 222-227.

5. **Христинич, А. Р.** Сопряженный электротепловой расчет триметаллического контакта при протекании электрического тока/ А. Р. Христинич, Е. В. Христинич, Р. М. Христинич// Вестник КрасГАУ. Вып. 2, 2008. –№ 2. - С. 270-275.

- в других изданиях:

6. **Христинич, А. Р.** МГД-технологии рафинирования и приготовления алюминиевых сплавов в транспортных ковшах / А. Р. Христинич, А. М. Велентеенко, Р. М. Христинич, Е. А. Головенко// Электрометаллургия, 2008. –№ 11. - С. 2-6.

7. Программный комплекс «Энергопро-надежность». Р. М. Христинич, Е. В. Христинич, **А. Р. Христинич**. Свидет. об офиц. регистр. прогр. для ЭВМ №2009613784, заявка № 2009612678 от. 03.06.2009г.

8. **Христинич, А. Р.** Проектирование электротехнологических установок. Тепловой расчет: метод. указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов укрупненной группы направления подготовки специалистов 140000 – «Энергетика. Энергетическое машиностроение и электротехника» [Текст] / сост.: А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. – 51с.

- в материалах международных, всероссийских, межрегиональных и региональных конференций:

9. **Христинич, А. Р.** Управление структурой слитков из алюминиевых сплавов в процессе непрерывного литья / А. Р. Христинич, Р. М. Христинич // Энергетика в глобальном мире: Сборник тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса / Сибирский федер. ун-т. – Красноярск: изд-во ООО «Версо», 2010. – С. 323-324.

10. **Христинич, А. Р.** Расчет надежности электрического плавно-литейного агрегата для приготовления и разлива алюминиевых сплавов / А. Р. Христинич. Материалы 15-й междунаучн.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых: Современная техника и технологии. Изд-во ТПУ, Томск, 2009. – С. 121-123.

11. **Христинич, А. Р.** Повышение эффективности электрического плавно-литейного агрегата для алюминия / А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич // Материалы 4-й научно-техн. конф. с междунаучн. участием: ЭЭЭ-2009. Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2009. – С. 213-218.

12. **Христинич, А. Р.** Определение надежности систем электроснабжения методом нейронного прогнозирования / А. Р. Христинич, Е. В. Христинич, Р. М. Христинич // Сб. трудов 6-й междунаучн.-техн. конф.: Эффективность и качество энергоснабжения промышленных объектов. Изд-во ПДТУ, Мариуполь, 2008. – С. 299-301.

13. **Христинич, А. Р.** Прогнозирование электропотребления на основе нейронных алгоритмов / А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич // Труды 2-й Всерос. научно-техн. конф. с междунаучн. участием: Проблемы электротехники, электромеханики и электротехнологии. Тольятти: ТГТУ, 2007. – С. 206-210.

14. **Христинич, А. Р.** Виртуальная диагностика маслонеполненных трансформаторов / А. Р. Христинич, Р. М. Христинич, Е. В. Христинич // Материалы 3-й научно-техн. конф. с междунаучн. участием: ЭЭЭ-2007. Изд-во НГТУ, Новосибирск, 2007. – С. 19-25.

15. **Христинич, А. Р.** Тепловой расчет способом теплопередачи в программном комплексе ANSYS / А. Р. Христинич // Матер. Всерос. Научн.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых: Молодежь и наука: начало 21 века. Ч.1. – Красноярск: СФУ, 2007. – С. 281 – 284.