

На правах рукописи



**Ковальский Виктор Васильевич**

**ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ МГД НАСОС ДЛЯ  
СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАСПЛАВ  
АЛЮМИНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЛИТЬЯ ИЗ  
СТАЦИОНАРНОГО МИКСЕРА**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск 2010

Работа выполнена в научно-инновационном центре “Электротехнологии в металлургии” кафедры “Электротехнологии и электротехника” Политехнического института Сибирского федерального университета

Научный руководитель: кандидат технических наук  
Головенко Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Лукутин Борис Владимирович

кандидат технических наук, доцент  
Жуков Сергей Павлович

Ведущая организация ООО “Резонанс”, г. Красноярск

Защита состоится “29” сентября 2010 года в 14:00 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 при Сибирском федеральном университете по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, корпус “А”, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г2-74.

Автореферат разослан “29” августа 2010 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук., доцент



Т.М. Чупак

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из технологических операций в процессе получения алюминиевых сплавов, стабильность, которой в существенной степени определяет качество этих сплавов, является процесс выдачи расплава алюминия из раздаточного миксера и его доставка до кристаллизаторов литейных машин и конвейеров. Поэтому металлурги на протяжении нескольких десятилетий не оставляют попыток осуществить механизацию и автоматизацию этого процесса, что на практике трудно достижимо из-за агрессивности жидкого алюминия и его повышенной окисляемости. Известны механические способы дозированной подачи металла. Однако они или недостаточно надежны, или чрезмерно дороги. В работе рассмотрены альтернативные механическим способы решения проблемы. Посредством индукционных магнито-гидродинамических (МГД) насосов.

Применение МГД устройств для силового бесконтактного воздействия на расплав предложено Л.А. Верте еще в середине XX века (авт. с. № 113 697, 1948 г.). С тех пор проблеме автоматизированной выдачи алюминия из стационарных миксеров посвящено множество научных исследований, например, А.И. Вольдека, В.Д. Мищенко, Б.И. Украинцева, М.Ю. Каневского, В.Н. Тимофеева, Т.А. Бояковой, других ученых и инженеров. Однако до сих пор нет надежного МГД устройства, которое полностью удовлетворяло бы требованиям технологии производства алюминиевых сплавов и эксплуатационной надежности.

Наиболее перспективным из линейных индукционных МГД насосов, с точки зрения эксплуатационной надежности, является цилиндрический МГД насос (ЦН), помещаемый в леточное пространство стационарного миксера. ЦН для алюминия впервые создан и испытан на Красноярском металлургическом заводе инженером В.Е. Тимошевым. Простая цилиндрическая форма канала и компактное расположение насоса в летке миксера стали удачным техническим решением, но наличие проточного водяного охлаждения, а так же низкая эффективность машины в “вентильном режиме” на максимальном уровне расплава и при плавлении твердой алюминиевой пробки в канале перед началом литья, не позволили цилиндрическому МГД насосу получить широкое распространение в литейных производствах при автоматизации процесса литья алюминия.

Надо так же отметить, что все научные исследования МГД устройств для транспортировки расплавов предполагали допущение о представлении жидкометаллического рабочего тела в виде твердого тела без учета сложного магнито-гидродинамического течения в канальной части, что отчасти приемлемо для плоских линейных индукционных машин (ЛИМ) с их относительно ламинарным течением жидкометаллического рабочего тела, но дает существенное искажение картины физических процессов в индукционной системе цилиндрических МГД насосов (без внутреннего сердечника) из-за сложных турбулентных МГД течений в их канальной части. С появлением современных вычислительных методов и коммерческих программ для численного моделирования, исследователи получили новые мощные инструменты научных

исследований. Так, например, после приобретения ФГОУ ВПО “Сибирский федеральный университет” академической лицензии ANSYS (№ 00144095), автору было предложено предпринять попытку создания ЦН, который сможет удовлетворить высоким требованиям металлургов с использованием современных методов и средств математического моделирования.

**Объект исследования:** цилиндрический МГД насос с жидкометаллическим рабочим телом, как исполнительный элемент для управления скоростью литья алюминия из стационарного раздаточного миксера, рассматриваемый с точки зрения эффективного преобразования электрической энергии индуктора в механическую и тепловую энергию жидкометаллического рабочего тела.

**Предмет исследования:** физические явления и процессы, лежащие в основе функционирования цилиндрических МГД насосов с жидкометаллическим рабочим телом с учетом сложного магнитогидродинамического движения расплава в бегущем магнитном поле.

**Целью диссертационной работы** является развитие методов анализа, синтеза и параметрической оптимизации индукционных цилиндрических МГД насосов, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность преобразования электрической энергии в механическую и тепловую, а также достаточную надежность и эффективность процесса эксплуатации установки при различных режимах работы, с учетом сложного МГД течения расплава в канальной части насоса.

Для достижения поставленной цели **необходимо решение следующих задач:**

1. Проведение анализа и обобщение опыта существующих технических систем и особенностей эксплуатации, индукционных МГД машин с жидкометаллическим рабочим телом, а также методов анализа и оптимизации, индукционных МГД насосов, формализация технических требований к рассматриваемой системе.

2. Разработка математической модели электромеханического преобразования энергии, учитывающей электромагнитное и гидродинамическое поля и процессы тепломассопереноса в индукционной системе “цилиндрический МГД насос – жидкометаллическое рабочее тело”.

3. Проверка достоверности результатов математического моделирования путем сопоставления результатов расчетов с результатами натуральных исследований на физической модели.

4. Проведение серии математических и натуральных экспериментов с целью исследования физических явлений и процессов, лежащих в основе функционирования цилиндрических МГД насосов с жидкометаллическим рабочим телом с учетом сложного магнитогидродинамического движения расплава в бегущем магнитном поле для различных режимов работы ЦН (вентильный, насосный, плавление).

5. Выбор и обоснование технических решений по повышению надежности и эффективности работы цилиндрических насосов, а также разработка новой конструкции МГД насоса, которая будет работать достаточно эффек-

тивно в различных режимах работы, и удовлетворять требованиям эксплуатационной надежности.

**Методы исследования:** в работе использован численный метод конечных элементов (МКЭ) для решения задачи анализа электромагнитного и гидродинамического полей (с использованием имеющегося в наличии лицензионного пакета программ ANSYS, академическая лицензия СФУ 00144095) в индукционной системе “цилиндрическая ЛИМ – жидкометаллическое рабочее тело”, методы параметрической оптимизации, методы воспроизведения натуральных экспериментов во время экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Теоретические исследования проводились на базе методов теоретических основ электротехники, гидродинамики, математической физики, теории электромагнитного поля, теории установок индукционного нагрева и электрических машин.

**Научная новизна результатов** диссертации заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель для анализа электромагнитных и гидродинамических процессов в индукционной части цилиндрического МГД насоса, с учетом сложных процессов перераспределения мощности в многофазных несимметричных магнитной и электрической цепях индукционного насоса. В результате предложены способы симметрирования электрической и магнитной цепей, повышающие эффективность преобразования энергии.

2. Определены зависимости электромагнитных параметров индукционной системы установки и гидродинамических процессов в канальной части цилиндрического МГД насоса от основных конструктивных параметров и схем включения обмоток индуктора, которые легли в основу создания новых конструкций линейных индукционных машин с повышенными технико-экономическими показателями.

3. Разработан алгоритм синтеза параметров питающей индуктор системы ЭДС, позволяющий повысить эффективность преобразования электрической энергии в механическую и тепловую для различных режимов работы цилиндрической линейной индукционной машины с использованием стандартных методов и средств управления.

**Значение для теории:** Развита теория линейных индукционных машин с жидкометаллическим рабочим телом в части учета гидродинамических течений в канале машины и существенной несимметрии магнитной и электрических цепей линейной малополюсной индукционной системы.

**Практическая ценность:**

1. Разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации цилиндрических ЛИМ, направленные на увеличение эксплуатационной надежности цилиндрических МГД насосов, повышение эффективности преобразования электрической энергии в механическую и тепловую путем выбора оптимальных конструктивных параметров, снижение потерь электрической энергии машины, и как следствие, снижение тепловой нагрузки на электрическую изоляцию токоведущих частей машины.

2. Разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров настройки стандартных регуляторов автоматизированной системы управления

литьем алюминия из стационарных раздаточных миксеров, обеспечивающих эффективную работу МГД насоса в требуемых технологических режимах.

**На защиту выносятся:**

1. Математическая модель индукционной системы «цилиндрический МГД насос – жидкометаллическое рабочее тело».

2. Алгоритм и результаты оптимизации конструкции цилиндрического насоса и параметров его электропитания для различных режимов работы.

3. Новые технические решения, направленные на повышение эффективности преобразования электрической энергии в механическую и тепловую в индукционной системе МГД насоса, а также повышение его эксплуатационной надежности.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена сопоставлением результатов численного эксперимента, полученных с помощью разработанной математической модели, с результатами натуральных экспериментов, полученных на физической модели и действующем опытно-промышленном образце.

**Реализация результатов диссертационной работы:**

Результаты диссертационной работы использовались в ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» и ООО «Резонанс» при разработке установок для автоматического управления литьем алюминия из стационарных миксеров с помощью цилиндрического МГД насоса, которые были испытаны в первом литейном отделении дирекции литейного производства ОАО «РУСАЛ-Красноярск» (копии актов прилагаются к диссертационной работе).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались: на Межрегиональном научном фестивале «Молодежь и наука – третье тысячелетие» (г. Красноярск, 2005 г.); на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века» (г. Красноярск, 2005 г.); на выставке «Научно-техническое творчество молодежи» (г. Москва, 2005 г.); на пятой Региональной научно-практической конференции «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» (г. Томск, 2005 г.); на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало XXI века» (г. Красноярск, 2005 г.); на юбилейном конкурсе «Молодежных инновационных проектов КГТУ-2006» (г. Красноярск, 2006 г.); на Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008 г.); на Пятнадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электроника и энергетика» (г. Москва, 2009 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 2 статьи в изданиях по перечню ВАК, 2 патента РФ на полезные модели, 13 публикаций в межвузовских сборниках научных трудов, сборниках международных и всероссийских научно-практических конференций и семинаров.

**Личный вклад автора** состоит в разработке математических моделей, алгоритмов и программ расчета и оптимизации цилиндрических МГД насосов, проведении вычислений, организации и проведении натуральных экспериментов, оформлении работ, проведении проектно-конструкторских работ, управлении процессами модернизации и внедрения технических систем.

**Структура и объем диссертации.** Результаты работы изложены на 154 страницах текста, иллюстрированного 12 таблицами и 64 рисунками. Список использованных источников включает 114 наименований. Работа состоит из введения, четырех разделов текста с выводами по каждому из них, заключения, списка использованных источников и приложений на 2 листах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, определены ее цель и задачи, отражены научные результаты, их научная новизна, теоретическая значимость и практическая ценность, а также приведено краткое содержание работы.

**Первый раздел** посвящен обзору устройств магнитной гидродинамики для нужд металлургии и литейного производства, а также методов их расчета и проектирования. В разделе выявлены особенности исследования, проектирования и эксплуатации линейных индукционных машин с жидкометаллическим рабочим телом, определены требования металлургов к МГД насосам для транспортировки расплава алюминия, описаны характерные режимы работы машин данного типа и определены пути развития методов анализа и оптимизации индукционных МГД насосов, формализованы технические требования к технической системе в целом.

По технологии приготовления алюминиевых сплавов, расплав алюминия перед кристаллизацией готовится в миксерах и печах по химическому составу и температуре. Затем через леточное отверстие в стенке миксера по леточному желобу (рис.1) металл течет самотеком из ванны миксера в кристаллизатор. Литейщик с помощью литейной пика либо полностью перекрывает поток металла до начала литья,



Рис. 1

либо регулирует скорость литья путем перемещения пика относительно леточного отверстия вручную

В 1948 году Л.А. Верте предложил способ регулирования скорости литья расплавов (рис. 2) из печи 1 в кристаллизатор 2 с помощью линейного индукционного насоса 3, в рабочем зазоре, которого расположен металотракт 4 с жидкометаллическим рабочим телом 5. Впоследствии были предложены различные МГД устройства для силового воздействия на расплавы металлов

для различных металлов, но проблема автоматизации и механизации литья алюминия и его сплавов с помощью МГД насоса не решена и по сей день.

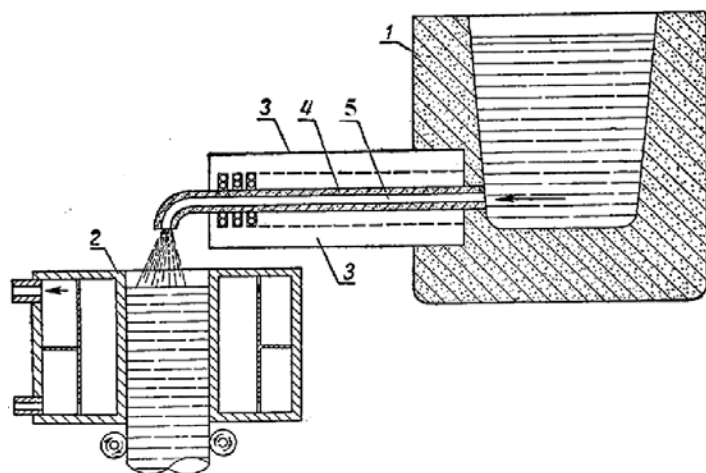


Рис. 2

Несмотря на то, что для решения данной задачи различными исследователями и инженерами использовались различные типы МГД устройств (плоские односторонние ЛИМ под наклонным желобом, плоские машины с поперечным потоком и С-образными магнитопроводами, плоские двухсторонние ЛИМ и так далее), все же наиболее пер-

спективным с точки зрения эксплуатационной надежности является цилиндрический МГД насос без внутреннего магнитопровода (рис. 3). Цилиндрический МГД насос 1 помещается в чугунную летку 2, зафутерованную в стенке миксера (рис. 4). Для защиты индуктора и чугунной летки от теплового и химического воздействия со стороны расплава алюминия предусмотрена футеровка в виде заднего леточного камня 3, круглой огнеупорной трубы 4 и переднего леточного камня 5 с коническим отверстием для литейной пикки (см. рис. 1). Индуктор и футеровка сжимаются в леточном пространстве с помощью стальной плиты 6 как это показано на рис. 4.

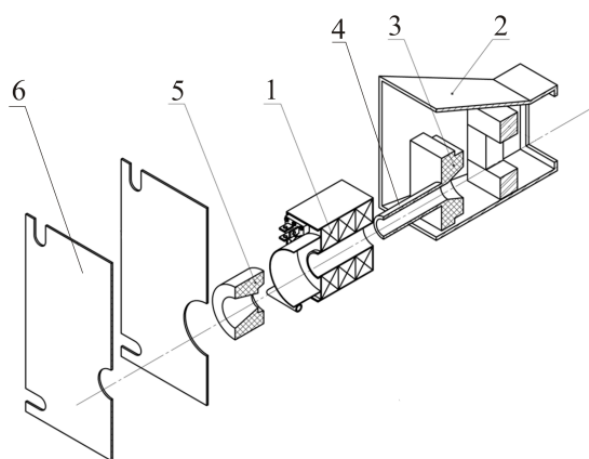


Рис. 3



Рис. 4

Анализ надежности цилиндрического насоса показал, что слабым местом системы, который приводил к снижению наработки на отказ индуктора до 6 месяцев, являлся металлтракт индуктора. Недостаточно большой внутренний диаметр канала 38 мм приводил к засорению канала шлаком, элементами футеровки ванны миксера и электролитом. Использование в качестве футеровки теплоизоляционного материала на основе жидкого стекла приво-



дило к преждевременному разрушению канала. Малая мощность, выделяющаяся в канальной части зачастую не позволяла расплавить алюминиевую пробку в канале перед литьем, что приводило к необходимости прожига места засора электрической дугой и соответственно повреждению канала и кожуха индуктора. Разрушение канала приводило к воздействию агрессивного расплава алюминия непосредственно на сам индуктор и утечке воды, охлаждающей токоведущие части индуктора.

В результате анализа эксплуатационной надежности предложены мероприятия, направленные на ее увеличение. На основании рекомендаций металлургов диаметр канала увеличили до 50 мм, что предотвращает засорение канала. В качестве футеровочного материала предложено использовать специальный бетон марки АКБФ с толщиной стенки 10 мм. Кроме того, усовершенствован переход между каналом и задним леточным камнем. Дополнительным ограничением для насоса стало увеличение тепловой мощности на уровне 11 кВт, что позволяет плавить застывшую алюминиевую пробку в канале в течение 120 секунд после включения индуктора перед началом литья алюминия. Для индуктора стояло также ограничение габаритов на уровне 220×220 мм, что является следствием стандартных размеров леточного пространства внутри чугунной летки для всех российских алюминиевых и металлургических заводов.

Цилиндрический МГД насос может работать в четырех различных режимах работы:

1. В вентильном режиме, в начале литья, когда необходимо противодействовать столбу расплава в миксере (при максимальной высоте расплава в ванне печи 1100 мм максимальный удерживаемый перепад металла составляет 850 мм при рабочем уровне металла в желобе 250 мм, см. рис. 4);

2. В насосном режиме, когда необходимо выкачивать металл из миксера при недостаточном давлении столба расплава (когда высота металла в ванне становится меньше критического уровня и давления столба не хватает для поддержания заданной скорости литья);

3. В режиме плавки алюминия в канале насоса, когда необходимо расплавить алюминиевую пробку перед литьем;

4. В режиме подогрева расплава в канале при временной приостановке литья, например, для подготовки литейной машины к литью новых слитков и не застывшем металле в канальной части (мощность, выделяемая в канале равна мощности тепловых потерь через стенки теплоизоляционного канала и составляет 940 Вт).

Описанные выше ограничения и условия стали исходными данными для расчета и проектирования цилиндрического МГД насоса. Как показало сопоставление расчетных данных с известными данными натуральных испытаний на действующем агрегате, инженерные методики расчета цилиндрических ЛИМ без внутреннего магнитопровода не позволяют получить достоверные данные.

Наиболее полную картину физических процессов в ЛИМ можно проанализировать на основе математического моделирования с использованием численных методов, что позволяет получить достоверную информацию об объекте исследования с учетом реальной геометрии устройства, нелинейности и анизотропии магнитных свойств магнитопровода и сложного магнитогидродинамического течения в канальной части ЦН без внутреннего сердечника. Кроме того, для создания новой конструкции, удовлетворяющей требованиям литейного производства необходимо использовать оптимизационные методы по поиску оптимальной геометрии канала, конструктивных параметров индуктора, снижению линейной токовой нагрузки, а также поиску оптимальных режимов работы установки в различных режимах работы.

Для анализа процессов протекающих в цилиндрическом МГД насосе была разработана математическая модель установки на базе лицензионного пакета программ ANSYS, позволяющая исследовать электромагнитные процессы в индукционной системе и магнитогидродинамические процессы в канале.

**Во втором разделе** представлена математическая модель для анализа электромагнитного и гидродинамического полей в канале установки, а также проведено сравнение данных математического и физического моделирования.

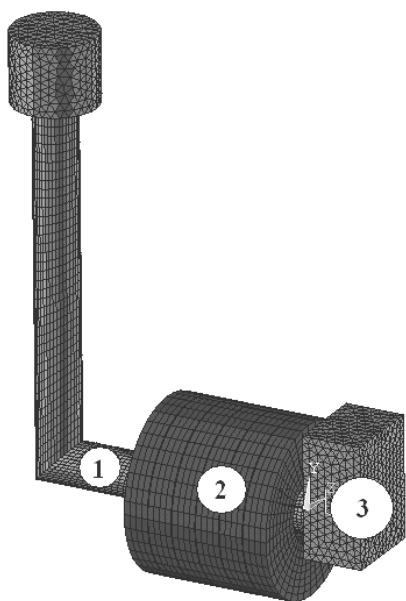


Рис. 5

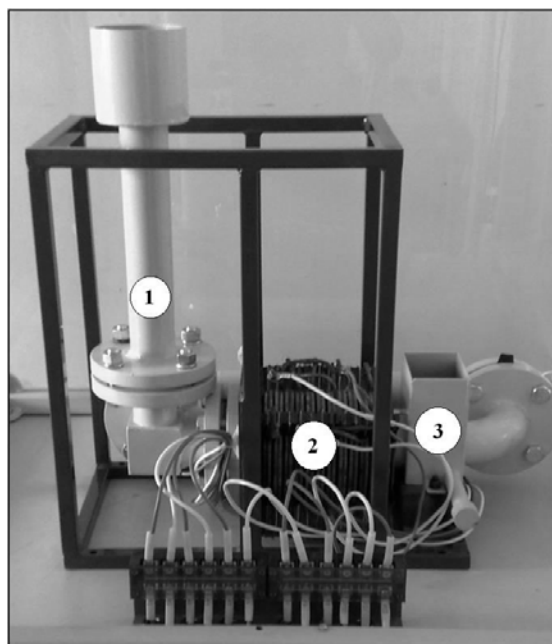


Рис. 6

Для проверки адекватности разработанной математической модели была создана физическая модель цилиндрического МГД насоса. На рис. 6 представлено фото физической модели. Вертикальный канал 1 учитывает возможный уровень расплава в ванне раздаточного миксера, а емкость 3 соответствует литейному желобу.

Данная физическая модель позволяет оценить перепад уровней моделирующего металла в сообщающихся каналах в зависимости от силы тока в обмотках индуктора, частоты питающего напряжения, а также в зависимости от схемы включения обмоток индуктора. Разработанная физическая модель также позволяет оценить работу установки в различных режимах.

Электромагнитная задача решается в расчетной области, представленной на рис.5. Основными элементами рассматриваемой задачи являются – металлотракт с твердометаллическим рабочим телом 1 и индуктор МГД насоса 2. На рис.5 приведены сетки конечных элементов для системы рабочее тело - индуктор.

Электромагнитное поле в расчетной области описывается системой уравнений Максвелла и материальными уравнениями. Решение уравнений в комплексе программ ANSYS выполнена относительно векторного магнитного потенциала:

$$\operatorname{rot} \bar{A} = \bar{B}; \quad (1)$$

$$\Delta \bar{A} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{\mu}{\rho} [\bar{V} \times \operatorname{rot} \bar{A}] = 0 \quad (2)$$

где  $\bar{A}$  – векторный потенциал  $\frac{B \cdot c}{m}$ ;  $\mu$  – магнитная постоянная;  $\bar{V}$  – вектор скорости движения элементарного объема жидкого металла;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление.

Для однозначного решения уравнений (1), (2) по всей области определены граничные условия в начальный момент времени, задаются токовые нагрузки в обмотках и определяются краевые условия.

*Краевые условия:* задается напряженность магнитного поля на границах расчетной области, то есть все магнитное поле существует внутри некоего объема, на границах которого оно полностью затухает. Через векторный магнитный потенциал  $\bar{A}$  это можно записать через условие Дирихле для касательных составляющих  $\bar{A}$ :

$$\bar{A}_{\tau} = 0. \quad (3)$$

*Начальные условия* в расчетной области определяют начальное состояние системы индуктор – жидкометаллическое рабочее тело и задаются следующим образом:

Для векторного потенциала  $\bar{A}$ :

$$\bar{A}_{ijk} \Big|_{t=0} = 0, \quad (4)$$

где индекс  $ijk$  – указывает номер расчетного узла,  $t$  – время.

В катушке ( $i=1 \div 6$ ) вектор плотности тока  $J_i$  можно представить в локальной цилиндрической системе координат:

$$\bar{J}_i = \begin{Bmatrix} J_r \\ J_\varphi \\ J_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ Ja_i \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

Решение магнитной гидродинамики в общей расчетной области сводится к решению двух задач, электромагнитной и гидродинамической. Общей областью для этих двух задач является область канала, где происходит взаимный учет сил и скоростей. На первом этапе решается электромагнитная задача, вычисляется поле сил, действующих на металл в канале. На втором этапе решается гидродинамическая задача.

Источниками сторонних сил в расчетной области являются силы Лоренца, полученные в ходе решения электромагнитной задачи:

$$\bar{F}_{Lijk}^0 \Big|_{t=0} = \bar{F}_{\mathcal{E}Mijk}^0 \Big|_{t=0} \in T.$$

На рис. 7 приведены траектории мгновенных скоростей в поперечном сечении канала в насосном режиме, на рис. 8 в режиме электромагнитного торможения металла.

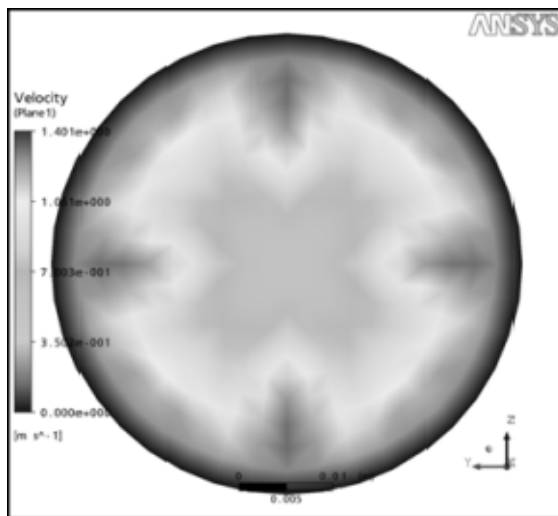


Рис. 7

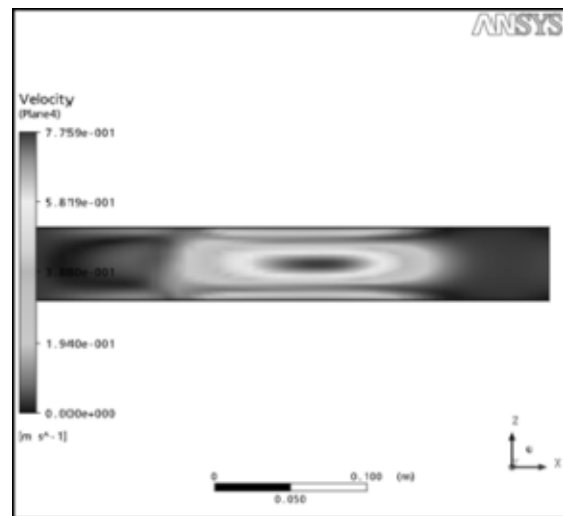


Рис. 8

При исследовании МГД насоса варьировались различные параметры модели: частота тока, сила тока, напряжение, прикладываемое к обмоткам индуктора, угол сдвига фаз, полюсное деление индуктора, остальные параметры модели считались постоянными.

В результате математического моделирования также были получены зависимости электромагнитного напора, сил Лоренца и количество Джоулева тепла в зависимости от частоты питающего напряжения, проведен поиск оптимальной частоты питания, с учетом гидродинамических течений в канале.

Данные представлены на рис. 9, где  $P_h$  - электромагнитный напор, развиваемый насосом (для жидкометаллического рабочего тела),  $F_x$  - сила Лоренца, действующая на твердометаллическое тело. На графиках видно, что если для твердометаллического тела оптимальная частота питающего напряжения лежит в пределах 270-350 Гц, то с учетом гидродинамических течений в канале, диапазон оптимальной частоты снижается и лежит в пределах 130-150 Гц.

Результаты математического моделирования сопоставлялись с результатами натурных экспериментов на физической модели, результаты сравнения приведены на рис. 10, где  $\Delta h$  - перепад высот в канале МГД насоса. Как видно из графика погрешность на превышает 12% для случая с жидкометаллическим рабочим телом и не превышает 5% для случая с твердометаллическим рабочим телом, что позволяет нам считать разработанную математическую модель достоверной.

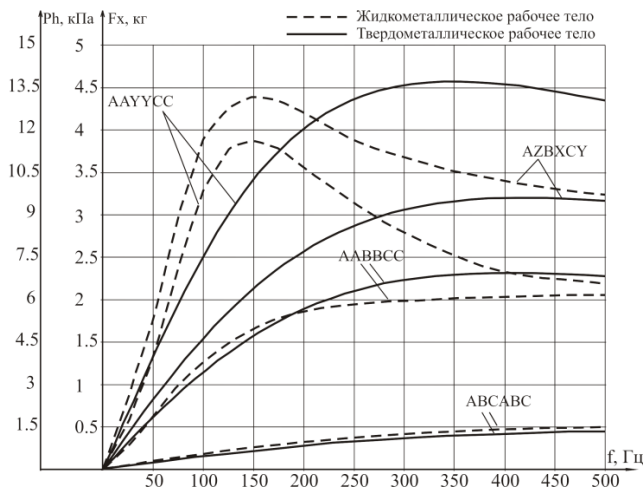


Рис. 9

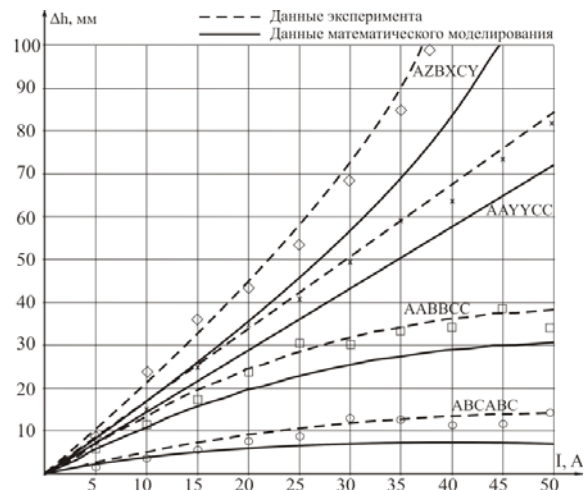


Рис. 10

**В третьем разделе** предложена методика параметрической оптимизации режимов работы цилиндрического насоса на базе разработанной математической модели.

МГД насос, расположен в ограниченном леточном пространстве, температура в котором достигает 450 °С. Поэтому появляется жесткое требование к габаритным размерам МГД насоса, ограниченное размерами леточного пространства и требованиями эксплуатационной надежности. Для того чтобы снизить токовую и механическую нагрузку индуктора, было решено оптимизировать режимы работы установки.

Анализ методов оптимизации позволил выделить наиболее эффективный алгоритм – генетический алгоритм Голланда, положительно зарекомендовавший себя в работе сотрудника кафедры “ЭТиЭТ” ПИ СФУ Е.В. Кузнецова. Преимуществом этого метода является высокая надежность нахождения глобального оптимума при наличии локальных минимумов.

Еще одной важной задачей является выбор критерия оптимальности. Очевидно, что для разных режимов работы МГД насоса, будут и разные целевые функции. Например, при работе установки в насосном режиме – целевой функцией будем считать электромагнитный напор, развиваемый МГД насосом в канале установки.

$$F_{ц} = k_1 \cdot \left| \frac{P_{H \max} - P_{ЭМ}}{P_{H \max}} \right| + k_2 \cdot \left| \frac{\delta_{\max} - \delta}{\delta_{\max}} \right|$$

В другом случае – когда насос работает в режиме индукционного нагревателя – целевой функцией является количество тепла, выделяющееся в металле.

$$F_{ц} = k_3 \cdot \left| \frac{P_{2H} - P_2}{P_{2H}} \right| + k_4 \cdot \left| \frac{\delta_{\max} - \delta}{\delta_{\max}} \right|$$

В том и другом случае, цель оптимизации – добиться заданной производительности МГД насоса, но при этом снизить потребляемую мощность, снизить потери в обмотках.



Рис. 11

Оптимизация режимов работы установки, а точнее связь генетического алгоритма Голланда с математической параметрической моделью осуществляется по следующей схеме (рис. 11).

В качестве оптимизируемых параметров использовались частота питающего напряжения, токи в катушках, а также углы сдвига фаз, т.е. таким образом, пытались осуществить симметрирование магнитной цепи машины. Оптимизационный

поиск проводился для следующих режимов работы МГД насоса:

- режим «Запирание» - МГД насос должен удерживать максимальный уровень (1100 мм) металла;

- режим «Вентильный» - уровень металла в миксере выше критического (340 мм), МГД насос поддерживает заданную скорость течения металла;

- режим «Выкачивание» - уровень металла в миксере ниже критического, МГД насос выкачивает металл из миксера и тем самым поддерживает заданную скорость течения металла;

- режим «Плавление» - подготовка к процессу литья металла, когда нужно расплавить застывший алюминий в канале МГД насоса.

Результаты оптимизационного поиска для описанных выше режимов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оптимизации

Режимы	Оптимизируемые параметры							Целевые функции	
	f, Гц	I <sub>1</sub> , А	I <sub>2</sub> , А	I <sub>3</sub> , А	φ <sub>1</sub>	φ <sub>2</sub>	φ <sub>3</sub>	P <sub>эм</sub> , кН/м <sup>2</sup>	P <sub>2</sub> , кВт
Запирание Dh=850 мм	95	64	35	74	0	67	135	514	2.43
Вентильный Dh=340-850 мм	95	2-60	2-60	2-60	0	37	154	0-430	0-2.12
Выкачивание Dh=0-340 мм	140	2-40	2-40	2-40	0	37	154	0-315	0-1.6
Плавление (подогрев)	200	143	74	94	0	202	195	134	10.87

**В четвертом разделе** представлены результаты исследований на экспериментальном стенде (рис. 12-13) в первом литейном отделении дирекции литейного производства ОАО «РУСАЛ-Красноярск», проведена отработка режимов работы цилиндрического МГД насоса и разработаны рекомендации по эксплуатации его на действующем агрегате.

Цилиндрический МГД насос был зафутерован в стенке транспортного ковша. От агрессивного воздействия расплава корпус насоса защищается керамическим металлотрактом и леточными камнями. Для питания индуктора используется реверсивный преобразователь частоты с воздушным охлаждением. Пределы регулирования: напряжения – от 0 до 380 В; частоты – от 2 до 200 Гц.

Управление цилиндрическим МГД насосом в ручном и автоматическом режимах осуществляется с пульта управления с микропроцессорной системой управления. Датчик уровня измеряет расстояние до зеркала металла и осуществляет управление расходом жидкого металла в автоматическом режиме, удерживая это расстояние на требуемом уровне с заданной точностью.



Рис. 14

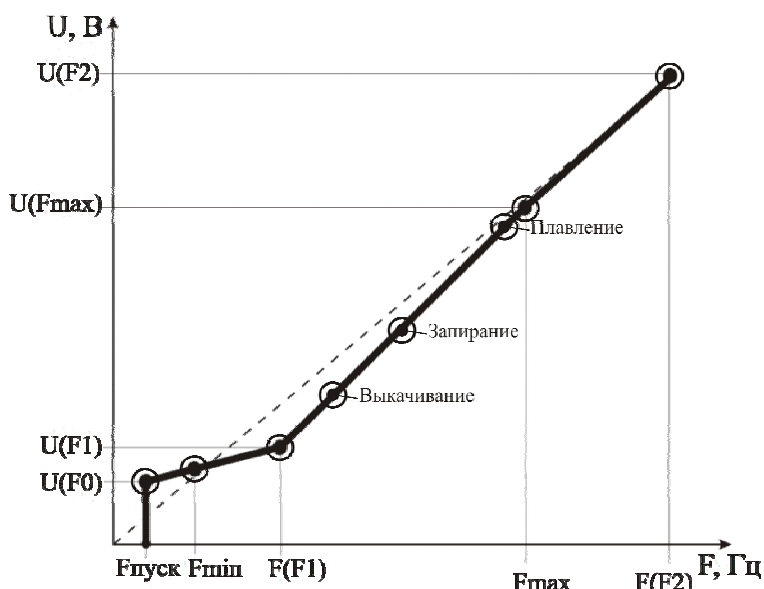


Рис. 15

Работа МГД насоса в автоматическом режиме осуществляется с помощью датчика уровня, сигнал от которого через блок согласования сравнивается с сигналом задания. В соответствии с сигналом рассогласования формируется управляющее воздействие на силовые ключи инвертора преобразователя частоты. Структурная схема системы питания и управления МГД насоса приведена на рис. 14.

Силовой канал преобразователя осуществляет двухступенчатое преобразование электрической энергии – выпрямление сетевого напряжения с помощью нерегулируемого выпрямителя и последующее инвертирование выпрямленного постоянного по величине напряжения посредством автономного инвертора напряжения. Алгоритм ШИМ обеспечивает взаимосвязанное регулирование частоты  $F$  и величины  $U$  выходного напряжения по заданному закону (рис. 15), а

также формирует синусоидальную форму кривой тока нагрузки.

Датчики тока и напряжения в силовом канале служат для контроля, регулирования и измерения электрических параметров, в т.ч. для защиты от токов перегрузки и короткого замыкания, недопустимых отклонений напряжения.

Основной целью исследований на экспериментальном стенде было подтвердить работоспособность предложенной конструкции МГД насоса, отработать режимы работы.



Кроме того, необходимо было синтезировать параметры системы управления (таблица 2) для каждого режима работы МГД насоса, отработать их на действующем оборудовании.

Таблица 2 – Результаты синтезирования

Режимы	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
Запирание	10	2,5	2,11	1,43	1,14
Вентильный	8	0,4	1,16	1,36	0,87
Выкачивание	9	0,5	0,84	1,09	0,87
Плавление	15	0,5	1,47	1,25	0,95
Универсальная	9	0,4	0,91	1,25	0,95

Это означало подобрать коэффициенты  $k_1, k_2 \dots k_5$  для каждого из режимов работы МГД насоса.

На экспериментальном стенде были испытаны все режимы работы цилиндрического МГД насоса, подтверждена возможность его использования для регулирования расхода жидкого металла из стационарного раздаточного миксера, разработаны рекомендации по использованию МГД насоса на действующем литейном агрегате.

***Предлагаемый алгоритм работы МГД насоса:***

1. Подается питание на индуктор МГД насоса.
2. Нажимается кнопка «Включение», МГД насос переходит в режим «Запирание». Если леточный канал закрыт застывшим алюминиевым сплавом, рекомендуется на некоторое время включить режим «Плавление» для ускоренного плавления алюминия в канале.
3. Пробивается летка, теперь расплав в канале удерживается индуктором в режиме «Запирание».
4. Включается автоматический режим, МГД насос заполняет лоток и переходит в режим стабилизации уровня расплава. При необходимости уровень расплава можно скорректировать непосредственно в процессе литья.
5. Паузы в процессе литья для смены технологической оснастки обеспечиваются включением режима «Запирания» с последующим возвратом в автоматический режим.
6. По окончании процесса литья МГД насос переходит в режим «Запирания». Леточное отверстие закрывается для подготовки следующего цикла литья. Чтобы предотвратить застывание расплава в леточном канале рекомендуется на это время включить режим «Плавление».



полное запирание

течение самотеком

выкачивание металла

Рис. 16

В ходе выполнения экспериментов на экспериментальном стенде в первом литейном отделении дирекции литейного производства ОАО «РУ-

САЛ-Красноярск» было определено, что основные показатели цилиндрического МГД насоса соответствуют должному уровню качества и всем требованиям литейного производства. Работоспособность технической системы и эксплуатационная надежность подтверждена разрешением на применение № **РРС 00-23104**, полученным в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору после осуществления опытно-промышленных испытаний МГД насоса.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

При решении поставленных задач, получены следующие результаты:

1. На основе анализа существующих технических систем определены и формализованы требования к цилиндрическому индукционному МГД насосу, направленные на повышение технологической эффективности его применения и эксплуатационной надежности для различных режимов его работы. В частности предложены мероприятия, направленные на модернизацию канала в части его размеров и материала, а так же его сопряжения с задним леточным камнем. Определены требования по величине электромагнитного напора и полезной активной мощности в канальной части для всех четырех режимов работы. При проектировании насоса определен внутренний диаметр индуктора 78 мм и внешний габарит в вертикальной плоскости 220×220 мм при минимальной длине канала, что обусловлено конструктивными параметрами ванны печи и требованиями эксплуатационной надежности.

2. Разработана математическая модель электромеханического преобразования энергии, учитывающей электромагнитное и гидродинамическое поля и процессы тепломассопереноса в индукционной системе “цилиндрический МГД насос – жидкометаллическое рабочее тело”.

3. Подтверждена достоверность разработанной численной математической модели, путем сравнения данных численного эксперимента с данными натурных исследований на физических моделях в условиях лаборатории и на опытно-промышленном образце в 1 литейном отделении литейного производства ОАО «РУСАЛ-Красноярск» (Красноярский алюминиевый завод). При этом сопоставление параметров ЭМП и электрических величин в системе электропитания дало погрешность в пределах 5%, а гидродинамического перепада высот на физической модели в пределах 12 %, что существенно превосходит адекватность всех известных инженерных методик и математических моделей.

4. Определено, что в качестве основного способа увеличения эффективности работы установки для бесконтактного силового воздействия на расплав алюминия целесообразно использовать повышенную частоту питающего напряжения в диапазоне от 95 до 150 Гц, а также доказано, что при эксплуатации МГД насоса необходимо использовать трехпроводные схемы с

глухозаземленной нейтралью, что снижает действие эффекта переноса мощности между обмотками разных фаз.

5. Предложен способ повышения эффективности насоса симметрированием магнитной цепи за счет введения искусственной несимметрии питающих насос напряжений. С использованием оптимизационного алгоритма определены параметры питающего напряжения (схема включения, частота, амплитуды напряжений, фазы напряжений), которые позволили повысить электрическую эффективность насоса на 58%. Разработана новая конструкция насоса с повышенной эффективностью и новой системой охлаждения токоведущих частей индуктора, удовлетворяющая технологическим требованиям металлургов.

6. Синтезирована система управления ЦН на базе стандартного транзисторного частотного источника питания с коэффициентами задания кривой  $f=f(U)$ , приемлемой для всех четырех режимов работы индуктора.

### **Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

#### **Публикации из перечня ВАК и патенты:**

1. **Ковальский, В. В.** Исследование распределения мощности и температуры в трехфазных индукционных нагревателях / Е. А. Головенко, Е. В. Кузнецов, **В. В. Ковальский**, Е.С. Кинев, Д.В. Хохлов, А.В.Комаров // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2007. – Т.3. – №6. – С. 177-181.

2. **Ковальский, В. В.** Параметрическая оптимизация многофазных индукционных систем. / Е. С. Кинев, Е. А. Головенко, **В. В. Ковальский**, В. Ф. Фролов, Г. В. Шадрин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т.5. – №12. – С. 35-40.

3. **Пат. на полезную модель 45219** Российская Федерация, МПК7 Н 05 В 6/36. Индукционная установка сквозного нагрева / Е. А. Головенко, Е. С. Кинев, Е. В. Кузнецов, **В. В. Ковальский**, Д. В. Хохлов; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. тех. универ. – № 2004135051/22; заявл. 30.11.04; опубл. 27.04.05. Бюл. № 12. – 3 с.

4. **Пат. на полезную модель 45220** Российская Федерация, МПК7 Н 05 В 6/36. Индукционная установка сквозного нагрева / Е. А. Головенко, Е. В. Кузнецов, Е. С. Кинев, Д. В. Хохлов, **В. В. Ковальский**; заявитель и патентообладатель Краснояр. гос. тех. универ. – № 2004135052/22; заявл. 30.11.04; опубл. 27.04.05. Бюл. № 12. – 3 с.

#### **Прочие публикации**

5. **Ковальский, В. В.** Математическое моделирование электромагнитных процессов в обмотках индукционных установок сквозного нагрева ци-

линдрической загрузки / Е. В. Галунин, Е. С. Кинев, **В. В. Ковальский**, Е. В. Кузнецов, Д. В. Хохлов // Вестник Красноярского государственного технического университета. Вып. 37. Под ред. Н.Д. Демиденко. Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 58–67.

**6. Ковальский, В. В.** Математическое моделирование электромагнитного поля в цилиндрической линейной индукционной машине / Е. А. Головенко, Т. А. Боякова, **В. В. Ковальский**, Т. В. Петраченко, П. А. Хоменков // Вестник КГТУ Вып. 37 Под ред. Н.Д. Демиденко. Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 68-77.

**7. Ковальский, В. В.** Исследование электрических потерь в обмотках индукционных устройств сквозного нагрева цилиндрической загрузки / **В. В. Ковальский**, Е. В. Кузнецов, Д. В. Хохлов, А. Н. Плявина // Молодежь и наука: Начало XXI века: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: В 4-х ч. Ч.4. Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 122-124.

**8. Ковальский, В. В.** Магнитогидродинамическое устройство для автоматического регулирования расплава алюминия из стационарного миксера / **В. В. Ковальский** // V Региональная научно-практическая студенческая конференция ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ. – 2005. – Томск. – С. 209-210.

**9. Ковальский, В. В.** Магнитогидродинамическое устройство для автоматического регулирования расплава алюминия из стационарного миксера / **В. В. Ковальский**, Т. В. Петраченко // Молодежь и наука: Начало XXI века: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: В 4-х ч. Ч.4. Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2005. – С. 125-126.

**10. Ковальский, В. В.** Магнитогидродинамические устройства для регулирования расхода расплава алюминия из стационарного раздаточного миксера сопротивления / **В. В. Ковальский** // «Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи НТТМ – 2005». – 2005. – Москва. – С. 221-222.

**11. Ковальский, В. В.** Математическое моделирование МГД-дозатора / **В. В. Ковальский** // Молодежь и наука: Начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. Ч. 1. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2006. – С. 244-246.

**12. Ковальский, В. В.** МГД-установка для автоматического управления расходом жидкого металла / **В. В. Ковальский**, Д. В. Хохлов, В. Ю. Неверов // Молодежь и наука: Начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 1. – Красноярск: СФУ. – 2007. – С. 241-243.

**13. Ковальский, В. В.** Разработка трехфазной магнитогидродинамической (МГД) установки для перемешивания алюминия в миксере / **В. В. Ковальский**, Д. В. Хохлов, В. Ю. Неверов // Молодежь и наука: Начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции сту-

дентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 1. – Красноярск: СФУ. – 2007. – С. 250-252.

**14. Ковальский, В. В.** Математическое моделирование процесса индукционного нагрева цилиндрической загрузки / **В. В. Ковальский**, Д. В. Хохлов, В. Ю. Неверов // Молодежь и наука: Начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 ч. Ч. 1. – Красноярск: СФУ. – 2007. – С. 285-288.

**15. Ковальский, В. В.** Исследование магнитогидродинамического лотка с повышенной надежностью / **В. В. Ковальский**, В. Ю. Неверов, Д.В.Хохлов // XIV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых “Современные техника и технологии” СТТ 2008. Томск – ТПУ. – 2008. – С. 403-404.

**16. Ковальский, В. В.** Математическое моделирование электромагнитного поля в цилиндрической линейной индукционной машине / В.А. Горемыкин, **В. В. Ковальский**, Д. В. Хохлов, // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Пятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ. – 2009. – С. 156-157.

**17. Ковальский, В. В.** Оптимизация параметров плоской линейной индукционной машины с жидкометаллическим рабочим телом / **В. В. Ковальский**, В. Ю. Неверов, К.А. Михайлов // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Пятнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ. – 2009. – С. 165-166.

Подписано в печать 26.08.2010  
Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 1,2  
Тираж 100 экз. Заказ № 2248  
Отпечатано в типографии БИК СФУ  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а