

*На правах рукописи*  
*Власов*

ВЛАСОВ ДАВИД СЕРГЕЕВИЧ

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В НЕТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МОЩНЫХ  
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

05.09.10 – Электротехнология

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Алиферов Александр Иванович**

**Официальные оппоненты:** **Миронов Юрий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный работник высшей школы РФ,  
заслуженный деятель науки ЧАССР,  
Чувашский государственный университет  
имени И.Н. Ульянова

**Фаткуллин Салават Мирдасович**  
кандидат технических наук, директор  
научно-производственного центра  
ООО «РЭЛТЭК»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Национальный исследовательский  
университет «МЭИ»

Защита состоится 26 декабря 2013 года в 9<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан 25 ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, доктор  
технических наук, профессор



Нейман Владимир Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность.**

При проектировании мощных электротехнологических установок (ЭТУ) является актуальной проблема учёта влияния на электрические параметры системы магнитных и немагнитных конструктивных элементов, электрически изолированных от токоведущих частей.

Одними из таких нетоковедущих элементов является кольцо гидropriжима контактных щёк и тепловой экран узла подвода энергии к контактным щёкам руднотемической печи (РТП), охватывающие самоспекающийся электрод, которые могут быть изготовлены из меди, магнитной и немагнитной стали. Другим примером подобных металлоконструкций служит несущий рукав электрододержателя дуговой сталеплавильной печи (ДСП), находящийся под токоведущими трубошинами, который может быть изготовлен из конструкционной магнитной или немагнитной стали.

Наличие металлоконструкций вблизи токоподводов ЭТУ может влиять на ее электрические, энергетические и прочностные характеристики в степени, достаточной для нарушения работоспособности установки.

Находящиеся в переменном магнитном поле нетоковедущие элементы конструкции ЭТУ являются дополнительными потребителями энергии источника питания. Активная мощность, выделяемая в них, представляет собой дополнительные электрические потери, которые, как правило, учитываются при проектировании коэффициентом добавочных потерь при активных сопротивлениях. Нетоковедущие металлоконструкции влияют на конфигурацию магнитного поля токов токоведущих элементов, изменяя общую индуктивность токоподвода и коэффициент мощности ЭТУ. Все это негативно сказывается на электрических и рабочих характеристиках и в целом на энергоэффективности установки.

Кроме влияния на электрические параметры ЭТУ, металлоконструкции, поглощая активную мощность, нагреваются. Они находятся под воздействием высокотемпературной газовой среды и, в ряде случаев, периодически возникающих интенсивных тепловых потоков (например, свищ в РТП). В результате их нагрев может быть весьма существенным за счет поглощённой активной мощности и интенсивных тепловых потоков, попадающих на них, и оказывает влияние на работоспособность этих элементов конструкции, а значит и всей ЭТУ.

Чтобы иметь возможность прогнозировать и управлять взаимным влиянием токоведущих и нетоковедущих элементов конструкций мощных ЭТУ на этапе их проектирования, необходимо иметь универсальные и удобные методики учета влияния токов, расстояний до токоподводов, размеров и материалов нетоковедущих элементов на выделение активной и реактивной мощности в последних.

### **Объект исследования:**

Нетоковедущие элементы ЭТУ: рукава электрододержателей трехфазной ДСП; кольца гидроприжима контактных щёк и тепловые экраны РТП.

### **Предмет исследования:**

- Электромагнитные процессы в рукавах электрододержателей ДСП; влияние материала рукавов и относительного положения трубошин и рукавов на электрические, энергетические параметры участка трубошин трехфазного токоподвода ДСП.
- Электромагнитные и тепловые процессы в кольцах гидроприжима контактных щёк и тепловых экранах РТП; влияние материала колец и экранов на электрические параметры токоподвода РТП; влияние тепловых условий и материалов колец на их работоспособность.

### **Цель работы:**

1. Обеспечение работоспособности кольца гидроприжима контактных щек РТП, находящегося в зоне влияния электромагнитного поля трехфазной системы токов электродов и теплового воздействия из рабочего пространства печи.
2. Уточнение методики расчета импеданса токоподвода ДСП и РТП.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ существующих методик расчёта электрических потерь и температуры в нетоковедущих конструктивных элементах электротехнических и электротехнологических установок.
2. Анализ физических процессов, протекающих в нетоковедущих металлоконструкциях мощных ЭТУ под воздействием тока близлежащих токоведущих элементов и тепловых условий работы металлоконструкции.
3. Построение математических моделей, позволяющих проводить анализ связанных электромагнитных и тепловых процессов, выявлять закономерности их протекания и их влияние на электрические и энергетические параметры элементов токоподводов ЭТУ.
4. Сравнение полученных на математических моделях результатов с экспериментальными данными, с целью верификации используемых моделей и методов решения.
5. Разработка рекомендаций по учету влияния рукавов электрододержателей ДСП и тепловых экранов РТП на электрические параметры токоподвода и по выбору материала кольца гидроприжима контактных щек РТП, на этапе их проектирования.

### **Научная новизна состоит в следующем:**

1. Установлено, что активное сопротивление фаз трубошинного участка токоподвода ДСП может варьироваться в широких пределах в зависимости от относительного положения трубошин и рукавов.

2. Численным моделированием показано, что при образовании свища воздействие высокотемпературного потока газа на кольцо гидropriжима контактных щек РТП не приводит к выходу из строя кольца, выполненного из меди.
3. Показано влияние колец гидropriжима контактных щек и тепловых экранов РТП на ее импеданс.

#### **Практическая ценность.**

1. Разработаны рекомендации по учету влияния рукавов электрододержателей на электрические параметры трубошинного участка токоподвода ДСП.
2. Разработаны рекомендации по выбору материала кольца гидropriжима контактных щек РТП.
3. Разработаны рекомендации по учету влияния колец гидropriжима контактных щек и тепловых экранов узлов подвода энергии к электроду РТП на электрические параметры ее токоподвода.

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты исследования влияния температурных режимов и материала кольца гидropriжима контактных щек РТП на его работоспособность при воздействии на него высокотемпературного потока газа, поступающего из реакционной зоны.
2. Результаты исследования активного и индуктивного сопротивлений фаз трубошинного участка трехфазного токоподвода ДСП в зависимости от относительного положения трубошин и рукавов электрододержателей.
3. Результаты расчета активного и индуктивного сопротивлений фаз электродного участка трехфазной РТП с учетом наличия колец гидropriжима и тепловых экранов.
4. Разработанные рекомендации по учету влияния близлежащих металлоконструкций на электрические параметры токоподвода ДСП и РТП.
5. Разработанные рекомендации по выбору материала кольца гидropriжима контактных щек РТП.

#### **Личный вклад автора заключается в следующем:**

1. Анализ существующих методик расчёта электрических потерь и температуры в нетоковедущих конструктивных элементах электротехнических и электротехнологических установок.
2. Создание в ПО ANSYS конечно-элементной модели электромагнитных процессов трехфазной системы «рукава электрододержателей – трубошины» ДСП.
3. Оценка адекватности результатов численного моделирования связанных электромагнитных и тепловых процессов путем сравнения экспериментального температурного поля рукава электрододержателя

трехфазного агрегата ковш-печь (АКП-90) и температурного поля, полученного при численном моделировании в ПО ANSYS.

4. Создание в ПО ANSYS конечно-элементной модели, включающей трехфазную систему электродов, кольца гидроприжима контактных щек и тепловые экраны узла подвода энергии к электроду, для исследования электромагнитных процессов электродного участка токоподвода РТП.
5. Создание в ПО ANSYS конечно-элементной модели кольца гидроприжима контактных щек РТП для решения стационарной и нестационарной тепловой задач воздействия высокотемпературного потока газа на стенку кольца.
6. Анализ полученных результатов и разработка рекомендаций выполнены совместно с научным руководителем.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 13th International conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components ICEEE-2010 (September 19-25, 2010, Alushta, Crimea, Ukraine); XVII Congress UIE (May 21-25, 2012 St. Petersburg); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (2 - 4 декабря 2011г, Новосибирск); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 29 ноября - 1 декабря 2012г); Научно-практическая конференция с международным участием «Инновационная энергетика 2010» (10-12 ноября 2010 г., Новосибирск); International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10 «Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Electromagnetic Processing» (Italy, Padua, May 18-21, 2010); International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-13 «Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Electromagnetic Processing», (Italy, Padua, May 21-24, 2013); The 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 IFOST 2013 (June 28 - July 1, Ulaanbaatar, Mongolia), а так же на семинарах кафедры автоматизированных электротехнологических установок Новосибирского Государственного Технического Университета.

#### **Реализация результатов работы.**

Рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, были использованы ОАО «Сибэлектротерм» при проведении работ по совершенствованию токоведущего рукава агрегата ковш-печь. Результаты работы были внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и учебных материалов для аспирантов Российских и Европейских университетов по проекту TEMPUS «PhD Education in Energy Efficient Electrotechnologies at Russian Universities».

### **Публикации.**

Основные научные результаты опубликованы в 15 печатных научных работах, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованный ВАК РФ, 10 докладов на конференциях.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список использованных источников и приложения. Работа содержит 134 страницы основного текста, включая 43 рисунка и 9 таблиц. Список использованных источников состоит из 62 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель работы, выделены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту, отражены вопросы апробации и достоверности полученных результатов.

Опыт эксплуатации мощных ЭТУ показывает, что влияние металлоконструкций на работоспособность электротехнологических установок определяется несколькими факторами. С одной стороны, активная мощность, наведенная в нетоковедущих элементах ЭТУ, выделяемая в виде тепла, приводит к их перегреву и преждевременному выходу из строя. Например, возможен перегрев рукава электрододержателя в ДСП и АКП. В кольце гидropriжима контактных щек руднотермической печи такой потере работоспособности помимо активной мощности, выделяемой в кольце, способствует попадание на него высокотемпературного потока газа, прорывающегося из реакционной зоны.

С другой стороны, активная и реактивная энергия, выделяемые в металлоконструкциях ЭТУ, изменяют импеданс установки относительно источника питания. Это приводит к изменению электрических параметров и снижению эффективности ее работы.

**В первой главе** проведен анализ результатов исследований электротеплового состояния нетоковедущих металлических конструкций электротехнических и электротехнологических установок и методики учета электрических потерь в металлоконструкциях в электрических схемах замещения ЭТУ, представленных в литературных источниках.

Значительный вклад в исследование этих вопросов внесли Нейман Л.Р., Шуле Э.Х., Перекалина М.А., Татур Т.А., Кияница М.С., Данцис Я.Б. и др.

Анализ показал, что в опубликованных работах были представлены оценки выделяемой в нетоковедущих конструкциях активной мощности и температурного режима работы различных металлоконструкций электротехнического и электротехнологического оборудования. Однако, они

были сделаны на основе аналитических подходов со значительными допущениями для модельных конструкций (полубесконечное тело, бесконечный цилиндр, бесконечный металлический туннель прямоугольного сечения и т.д.). При проектировании же реальных ЭТУ обычно имеют дело с гораздо более сложными конструкциями, произвольно расположенными в пространстве. В ряде аналитических методик приближение расчета теплового состояния металлоконструкций ЭТУ к реальной ситуации выполнялось введением эмпирических коэффициентов (или зависимостей), полученных для конкретных геометрических соотношений в системе «металлоконструкция – токоподвод».

Поэтому непосредственное использование имеющихся в литературных источниках методик для расчета теплового состояния металлоконструкций крайне затруднено в силу необходимости поиска экспериментальным путем (или путем численного моделирования) коэффициентов, приводящих результаты аналитических расчетов по идеализированным методикам к параметрам реальных конструкций. В связи с этим, необходимо дальнейшее совершенствование методик расчета с использованием численных методов расчета электромагнитных и тепловых полей в двух- и трехмерной постановках.

**Во второй главе** приведено описание физических, электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в системах «токоведущий элемент – металлоконструкция» с учетом конструктивных особенностей установок и представлена математическая модель, описывающая электромагнитные и тепловые процессы в нетоковедущих металлоконструкциях, находящихся вблизи токоведущих элементов.

Выполнена постановка задач исследований электромагнитных процессов для трехфазной системы «трубошины – рукава электрододержателя» ДСП и электротепловых процессов трехфазной системы «электроды – кольца – экраны» РТП.

Несмотря на различие конструкции и технологического назначения, очевидно, что кольца гидроприжима контактных щек РТП, тепловые экраны узла повода энергии к электроду РТП и рукава электрододержателей ДСП испытывают аналогичные воздействия со стороны близлежащего источника электромагнитного поля. В кольце, экране и рукаве наводятся вихревые токи, определяющие выделение активной мощности и, как следствие, их нагрев. Активная мощность, выделяющаяся в этих элементах, изменяет общее активное сопротивление токоподвода ЭТУ. Магнитная энергия, сконцентрированная в нетоковедущих металлических конструкциях, изменяет общую индуктивность токоподвода ЭТУ.

Такая схожесть физических процессов в этих нетоковедущих металлических конструкционных элементах позволяет составить для них единую электромагнитную математическую модель.



Для рукава электрододержателя ДСП определяющим тепловым условием работы является режим свободного конвективного теплообмена с газовой средой надсводового пространства электропечи.

Тепловые экраны узла подвода энергии к электроду РТП испытывают воздействие окружающей высокотемпературной газовой среды, т.е. имеет место режим конвективного и радиационного теплообмена поверхности кольца с газовой средой печи.

Тепловые процессы в кольцах гидropriжима контактных щек РТП определяются особенностями их работы: окружающая высокотемпературная газовая среда, т.е. режим конвективного и радиационного теплообмена поверхности кольца с газовой средой печи; водяное охлаждение кольца изнутри, т.е. режим вынужденного конвективного теплообмена кольца с водой; свищ – концентрированное кратковременное воздействие высокотемпературного потока газа из реакционной зоны печи, которое может приводить к разрушению кольца (рисунок 1).

В процессе регулирования тока дуги путем вертикального перемещения электрода или во время опускания электрода для компенсации его выгорания происходит разрушение корки в месте ее контакта с электродом – образуется свищ. Доведенные до состояния плазмы газы подэлектродного пространства вырываются из «тигля электрода» вертикально вверх вдоль электрода, попадая на нижний торец кольца гидropriжима контактных щек (рисунок 1). Внешне это выглядит как яркая вспышка длительностью до 3-5 минут.

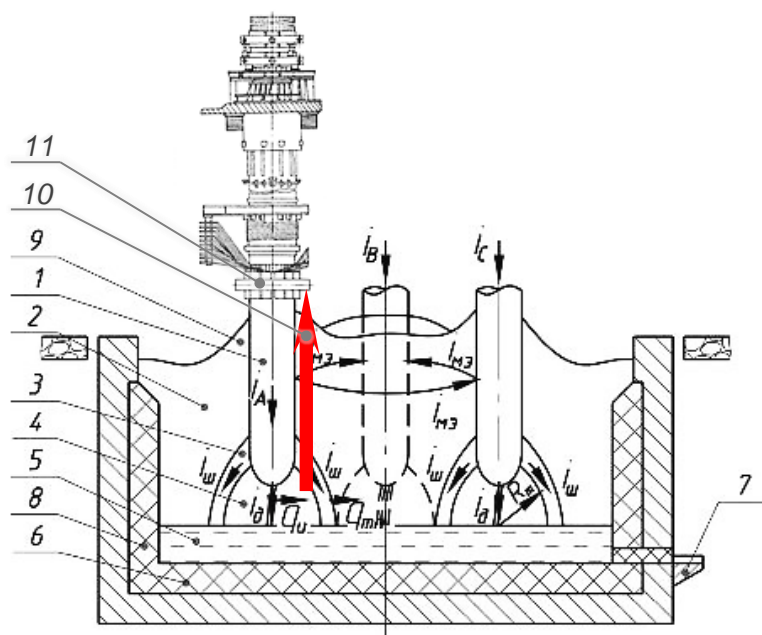


Рисунок 1 – Схема ванны РТП со свищем:

- 1 – электрод;
- 2 – шихта;
- 3 – стенка «тигля электрода»;
- 4 – газ высокой температуры;
- 5 – расплав;
- 6 – подина;
- 7 – леточное отверстие;
- 8 – футеровка стенки печи;
- 9 – колошник;
- 10 – поток газа при образовании свища;
- 11 – кольцо прижима щек.

**Электромагнитная задача** заключается в нахождении распределения характеристик электромагнитного поля в системе «металлоконструкция – токоподвод». По известному их распределению определяется поля объёмной плотности активной мощности и объёмной плотности магнитной энергии в элементах конструкции и в целом в установке.

В общем случае электромагнитная задача описывается с помощью системы уравнений Максвелла, связывающих плотность электрических зарядов и плотность электрического тока с создаваемыми ими полями, и трех уравнений, связывающих характеристики проводящей, магнитной и непроводящей сред.

Исследуемые системы состоят из проводящих тел, т.е. заряды в системе не накапливаются. А значит, нет токов смещения и можно исключить из математической модели уравнение Максвелла-Гаусса для дивергенции потока вектора электрического смещения. Таким образом, уравнения электромагнитного поля для исследуемых систем имеют вид:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (5)$$

где:  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\vec{B}$  – магнитная индукция, Т;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $\vec{J}$  – плотность электрического тока, А/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – электрическая проводимость материала, См;  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м.

**Тепловая задача** состоит в нахождении температурного поля в нетоководующих элементах конструкции установки. Исходными данными для решения тепловой задачи будут распределения объёмной плотности источников тепла в рассматриваемых элементах конструкции, полученные при решении электромагнитной задачи, их теплотехнические свойства, условия теплообмена на их граничных поверхностях.

В силу того, что удельное электросопротивление зависит от температуры, а относительная магнитная проницаемость – от напряженности магнитного поля, необходимо решение сопряженной электромагнитной и тепловой задачи.

Тепловые процессы в твердых телах в неустановившемся режиме описываются уравнением теплопроводности:

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = q_v, \quad (6)$$

где:  $T$  – температура (К),  $\lambda$  – теплопроводность (Вт/(м К)),  $\rho C_p$  – объемная теплоемкость (Дж/(м<sup>3</sup> К)),  $q_v$  – объемная плотность мощности источников тепла (Вт/м<sup>3</sup>).

В таком виде оно решается при моделировании воздействия высокотемпературного потока газа (свища) из реакционной зоны РТП на кольцо прижима щек.

В установившемся тепловом состоянии, т.е. когда температурное поле не меняется со временем, уравнение (6) можно упростить:

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = q_v, \quad (7)$$

В таком виде уравнение теплопроводности решается при моделировании теплового состояния кольца гидроприжима контактных щек РТП до образования свища и рукава электрододержателя АКП.

При этом распределение объемной плотности мощности источников тепла для элементов РТП и АКП находится при решении соответствующей электромагнитной задачи:  $q_v = f(x, y, z) = \vec{E} \cdot \vec{j}$ .

Граничные условия, при которых решается задача установившегося теплового режима для кольца прижима контактных щек РТП, следующие:

- на внутренней поверхности кольца задано граничное условие 3-го рода, поскольку здесь происходит вынужденный конвективный теплообмен с охлаждающей водой. Тепловой поток на внутренней поверхности кольца задается следующим выражением:

$$q = -\alpha (T - T_a), \quad (8)$$

где:  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $T_a$  – температура окружающей среды, К;

- на наружной поверхности кольца также задается граничное условие третьего рода, поскольку теплообмен на ней реализуется конвекцией и излучением. Тепловой поток здесь выражается уравнением:

$$q = -\alpha (T - T_a) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4), \quad (9)$$

где:  $\varepsilon$  – степень черноты, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана;

Граничные условия для задачи неустановившегося теплового режима для кольца гидроприжима контактных щек РТП при воздействии свища на него аналогичны приведенным выше. Сам свищ задается удельным тепловым потоком  $q_{св}$  на ограниченной поверхности нижнего торца кольца – условие второго рода:

$$q = -q_{св}. \quad (10)$$

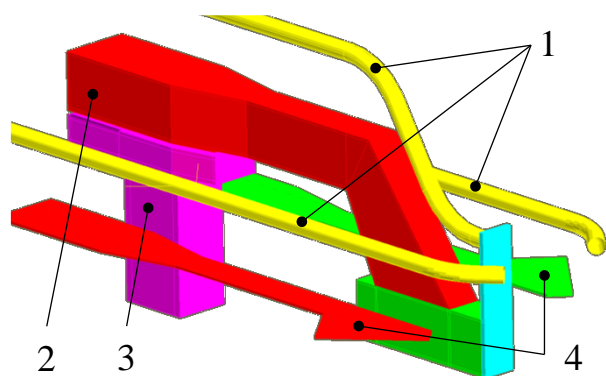
Начальные условия, описывающие температурное поле в кольце в момент удара свища, представляют собой распределение температур, полученное в результате решения стационарной задачи.

При моделировании тепловых процессов в электрододержателе АКП-90 заданы граничные условия 3-го рода на всех его поверхностях, которые описываются уравнением (9).

**В третьей главе** приводятся результаты численного 3D моделирования электротепловых процессов в металлоконструкциях ЭТУ в программном обеспечении ANSYS и оценка адекватности моделей по экспериментальным данным.

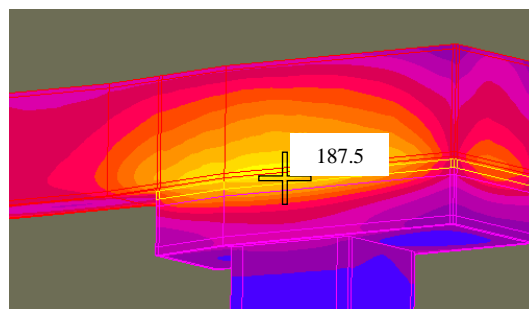
Для оценки адекватности разработанных моделей был выполнен тестовый расчет по определению температурного поля в рукаве электрододержателя средней фазы АКП-90, находящемся в поле трехфазной системы токов (рисунок 2). Модель учитывает для материала электрододержателя зависимости теплопроводности и удельного электросопротивления от температуры, а также

зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля токов трубошин.

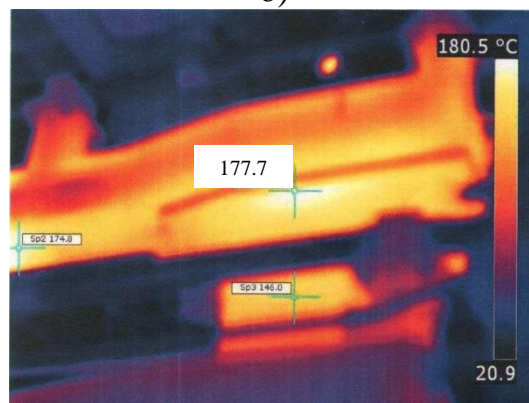


- 1 – трубошины трех фаз,
- 2 – рукав электрододержателя средней фазы,
- 3 – стойка электрододержателя средней фазы,
- 4 – части рукавов электрододержателя боковых фаз.

а)



б)



в)

Рисунок 2 – Модель трехфазной системы взаимодействия токов в трубошинах трех фаз и рукава электрододержателя средней фазы АКП-90: а) геометрия численной модели, б) рассчитанное температурное поле, в) экспериментальное температурное поле.

Сравнение модельного и экспериментального температурных полей показало высокую достоверность модели. Отличие температуры составило не более 5.5%.

Выполнены исследования активного сопротивления и индуктивности фаз трубошинного участка токоподвода в зависимости от относительного положения медных трубошин с учетом влияния рукавов электрододержателей. Общий вид трубошинного участка ДСП-100И6 приведен на рисунке 3.

В программном обеспечении конечноэлементного моделирования ANSYS создана трёхмерная расчетная модель трехфазной системы «рукава электрододержателя – трубошины» ДСП (рисунок 4).

При решении электромагнитной задачи две трубошины одной фазы были заменены эквивалентным коробчатый проводником.

Для исследования были выбраны расстояния между трубошинами и рукавами электрододержателей: для средней фазы  $h_2 = 500, 1000, 1500, 2000, 2500$  мм, для крайней фазы  $h_1 = 500, 1000, 1500$  мм (рисунок 4).

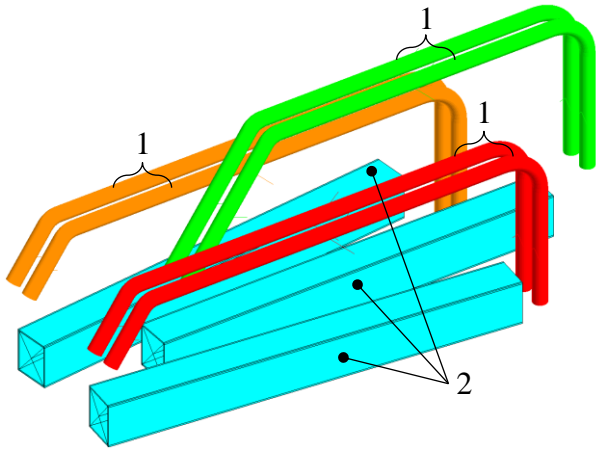


Рисунок 3 – Общий вид трубошинного участка токоподвода трехфазной ДСП:  
1 – трубошины фаз, 2 – стальные рукава электрододержателей.

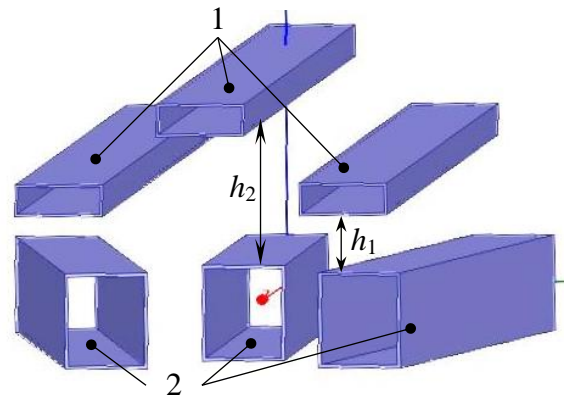


Рисунок 4 – Модель трубошинного участка ДСП: 1 – трубошины, 2 – рукава электрододержателей.

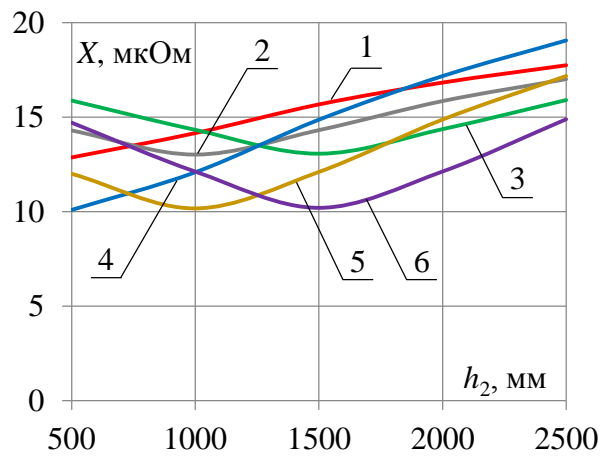
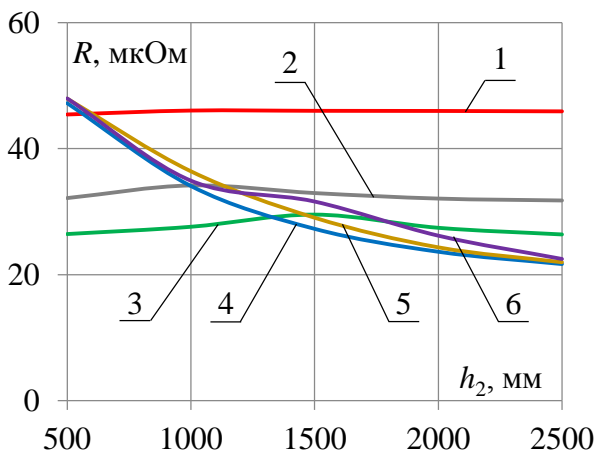


Рисунок 5 – Активные и индуктивные сопротивления фаз участка трубошин ДСП: 1, 2, 3 – крайняя фаза; 4, 5, 6 – средняя фаза; 1, 4 –  $h_1 = 500$  мм; 2, 5 –  $h_1 = 1000$  мм; 3, 6 –  $h_1 = 1500$  мм.

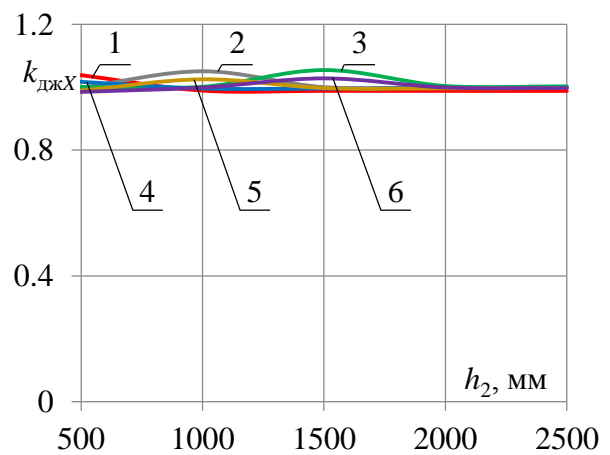
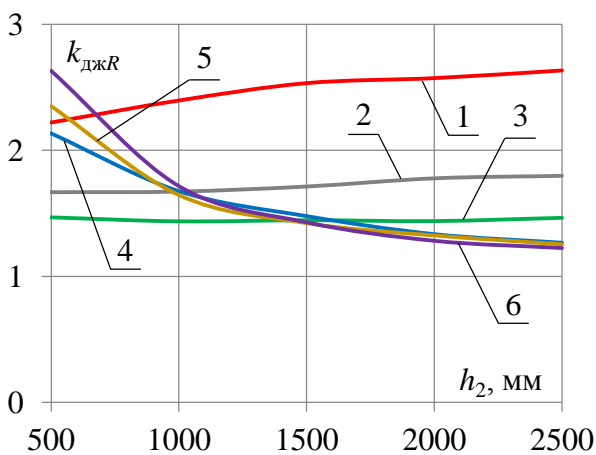


Рисунок 6 – Коэффициенты дополнительных потерь для активных и индуктивных сопротивлений фаз участка: 1, 2, 3 – крайняя фаза; 4, 5, 6 – средняя фаза; 1, 4 –  $h_1 = 500$  мм; 2, 5 –  $h_1 = 1000$  мм; 3, 6 –  $h_1 = 1500$  мм.

Исследования показали, что активные сопротивления фаз трубошинного участка токоподвода ДСП зависит от расстояния и относительного положения трубошин и рукавов электрододержателей (рисунок 5).

Коэффициент добавочных потерь, возникающих в металлоконструкциях, находящихся в электромагнитном поле токоведущих элементов, рассчитывается следующим образом:

$$k_{джR} = R_{фж}/R_{ф},$$

где:  $R_{фж}$ ,  $R_{ф}$  – сопротивление фазы участка токоподвода в присутствии близлежащих металлоконструкций и в их отсутствии соответственно.

Из графиков (рисунок 6) видно, что коэффициент уменьшается с увеличением расстояния между трубошинами и рукавами.

При этом влияние рукавов ДСП на индуктивность фаз трубошинного участка токоподвода ДСП незначительно. Таким образом, при расчете индуктивных сопротивлений трубошинного участка токоподвода ДСП наличием рукавов можно пренебречь. Для активного же сопротивления фаз трубошинного участка токоподвода ДСП  $k_{джR}$  может варьироваться в диапазоне 1.2 ÷ 2.6.

В среде конечно-элементного моделирования ANSYS была разработана модель трех электродов трехфазной РТП с кольцами гидropriжима щек и тепловыми экранами, позволяющая решать электромагнитную задачу (рисунок 7) для трёх различных материалов: медь, нержавеющая сталь 12X18H10T, конструкционная сталь Ст3.

Активные мощности и коэффициенты добавочных потерь фазы электродного участка РТП для разных материалов колец и экранов приведены в таблице 1. Модель полностью симметрична, поэтому расчетные параметры для всех фаз одинаковы. Полученные при наличии колец и экранов сопротивления и индуктивности фазы исследуемого участка совместно со значениями, рассчитанными в отсутствие металлоконструкций вокруг электродов, использовались для расчета коэффициентов добавочных потерь фаз участка.

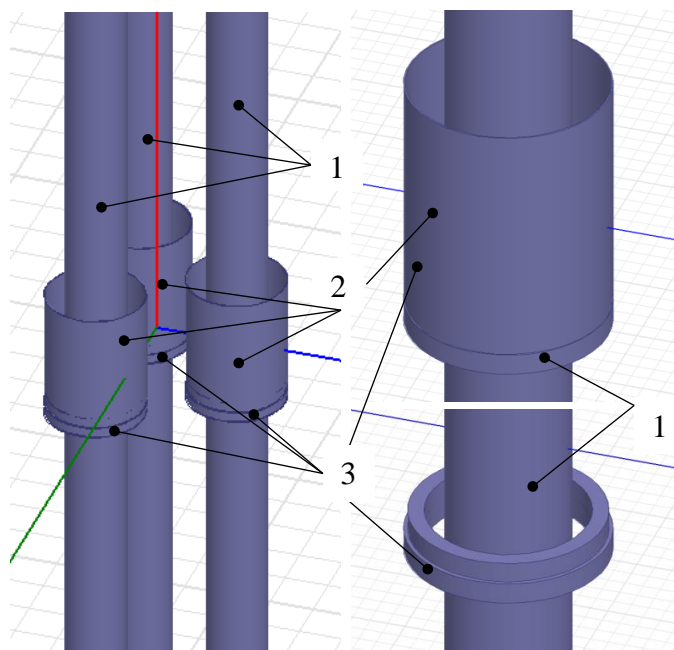


Рисунок 7 – Геометрия модели электродов РТП: 1 – самоспекающиеся электроды, 2 – тепловые экраны, 3 – кольца гидropriжима контактных щек.

Как видно из таблицы 1, медные кольца гидropriжима и тепловые экраны узла токоподвода вокруг электродов

РТП практически не изменяют электрические параметры фаз электродного участка по сравнению со свободными от металлоконструкций электродами и ими можно пренебречь при расчете активного и индуктивного сопротивлений фаз участка.

Таблица 1 – Электрические потери фазы электродного участка трехфазной РТП.

Материал кольца и экрана	$P_{эл}, кВт$	$P_{экр}, кВт$	$P_{коль}, кВт$	$k_R$	$k_L$
Меди	1535.333	8.421	4.340	~1.0	~1.0
Стали 12Х18Н10Т	1535.333	48.432	28.124	1.0485	~1.0
Стали Ст3	1535.333	213.1	147.1	1.1860	1.0410

Если указанные металлоконструкции выполнены из немагнитной стали, то индуктивность фазы участка практически не изменяется, а его активное сопротивление увеличивается почти на 5 %.

При использовании магнитной конструкционной стали для колец гидроприжима и тепловых экранов увеличение фаз электродного участка активного сопротивления составляет 18.6 %. Индуктивность участка в данном случае увеличивается на 4.1 %.

В среде конечно-элементного моделирования ANSYS была разработана модель кольца гидроприжима контактных щек РТП для решения стационарной и нестационарной тепловых задач.

Было рассчитано температурное поле прижимного кольца в нормальном рабочем режиме и в аварийном при воздействии свища на кольцо для трёх различных материалов: медь, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, конструкционная сталь Ст3. Нормальный режим работы определяется стационарным режимом теплообмена с газовой средой рабочего пространства РТП и нагревом вихревыми токами. Аварийный режим моделировался как тепловой поток плотностью 5 МВт/м<sup>2</sup>, падающий на участок нижней поверхности кольца, ограниченный окружностью диаметром 50 мм.

В таблице 2 сведены максимальная и минимальная температуры прижимного кольца в нормальном и аварийном (установившийся режим при наличии свища) режимах работы. Рисунок 8 иллюстрирует распределения температур в установившемся режиме под действием свища. Очевидно, что стальное кольцо расплавится, если не принять меры по удалению свища. Кроме того, кольцо из нержавеющей стали достигает в точке контакта с свищем температуры плавления через 6 секунд с момента контакта, а из конструкционной – через 12 секунд. При этом максимальная температура медного кольца в таком режиме работы не превышает 510 °С.

Для медного кольца были проведены дополнительные расчеты, чтобы выяснить максимально возможную толщину его стенки, при которой температура кольца под действием свища не превышает допустимой рабочей температуры для меди 800 °С. Результаты расчетов в виде максимальных температур кольца приведены на графике ниже (рисунок 9).



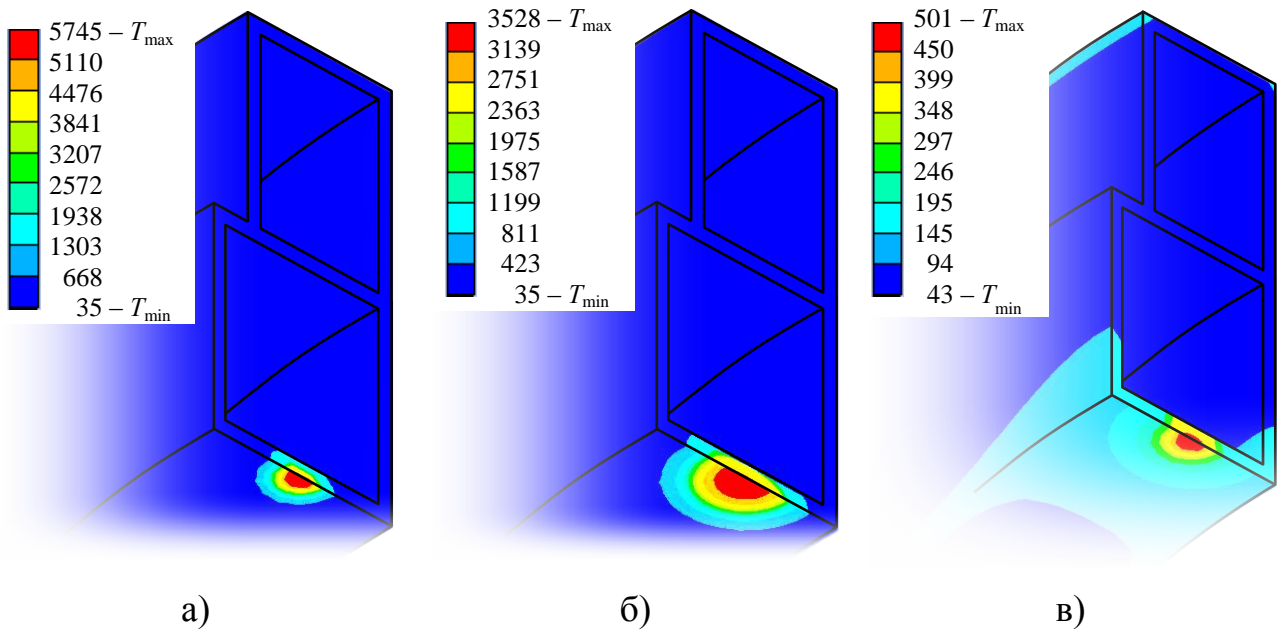


Рисунок 8 – Модельное температурное поле на поверхности кольца гидроприжима контактных щек РТП из:  
а) стали 12X18H10Т, б) стали Ст3, в) меди.

Таблица 2 – Минимальные и максимальные температуры

Кольцо из ...	Нормальный режим		Аварийный режим	
	$T_{min}, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	$T_{min}, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$
Меди	43	99	43	501
Стали 12X18H10Т	35	310	35	$> T_{пл} *$
Стали Ст3	35	190	35	$> T_{пл} *$

\*  $T_{пл}$  – температура плавления.

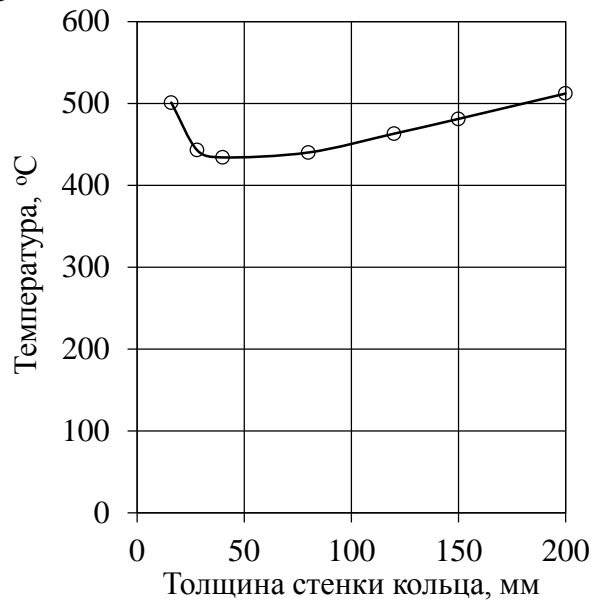


Рисунок 9 – Максимальная температура медного кольца в зависимости от толщины его нижней стенки.



С точки зрения минимальной температуры в точке контакта стенки медного кольца и газового потока при свище, оптимальным является диапазон толщин стенки кольца от 25 до 100 мм (рисунок 9).

**В четвертой главе** проведен анализ результатов исследований и разработаны рекомендации по учету влияния близлежащих металлоконструкций на токоподвод ДСП, а так же рекомендации для обоснования выбора материала и конструкции кольца прижима щек РТП.

Для различных расстояний от трубошин до рукавов электрододержателя трехфазной ДСП коэффициент добавочных потерь, учитывающий увеличение активного сопротивления участка токоподвода ДСП в присутствии металлоконструкций, лежит в диапазоне от 1.2 до 2.6.

Наиболее оптимальным материалом кольца гидроприжима контактных щек РТП для обеспечения его тепловой работоспособности является медь. При обеспечении коэффициента теплоотдачи в каналах водоохлаждения кольца не менее  $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  и толщине стенки, обращенной к рабочему пространству, от 25 до 100 мм, обеспечивается минимальная температуры в точке контакта кольца и интенсивных газовых потоков при образовании свища.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:**

1. Выполнены исследования температурных режимов работы кольца гидроприжима контактных щек РТП без и при воздействии на него высокотемпературного потока газа, поступающего из реакционной зоны при образовании свища, в зависимости от конструктивного исполнения и материала прижимного кольца. Установлено, что медное кольцо при обеспечении коэффициента теплоотдачи в каналах водоохлаждения кольца не менее  $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  не разрушается под действием интенсивных газовых потоков в случае образования свища.

2. Выполнены исследования активного и индуктивного сопротивлений фаз трубошинного участка токоподвода ДСП в присутствии рукавов электрододержателей, получены диапазоны изменения коэффициента добавочных потерь для активных и индуктивных сопротивлений. Разработаны рекомендации по учету влияния рукавов электрододержателей на электрические параметры трубошинного участка токоподвода ДСП.

3. Выявлено влияние колец гидроприжима контактных щек и тепловых экранов узла подвода энергии к электроду РТП на электрические параметры электродного участка токоподвода РТП. Разработаны рекомендации по учету влияния колец гидроприжима контактных щек и тепловых экранов узлов подвода энергии к электроду РТП на электрические параметры ее токоподвода.

**Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах (издания из списка ВАК):**

1. Программный комплекс для расчета индуктивных сопротивлений вторичных токоподводов электротехнологических установок / А. И. Алиферов, Р. А. Бикеев, **Д. С. Власов**, Л. П. Горева, П. В. Домаров // Электротехника. - М.: Изд-во МЭИ (ТУ), 2010. - № 5. - С. 33-37.
2. Исследование интегральных электрических параметров систем токоподводов электротехнологических установок / А. И. Алиферов, Р. А. Бикеев, **Д. С. Власов**, Л. П. Горева, Д. В. Скрипко; науч. рук. Р. А. Бикеев // Доклады АН ВШ РФ. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - № 2 (15). - С. 37-44.
3. Поверхностный эффект в тороидальных проводниках круглого сечения / А. И. Алиферов, С. Луци, М. Форзан, **Д. С. Власов** // Научный вестник НГТУ. - Новосибирск: Издательство НГТУ, 2010.-№4.- С. 73-82.
4. Математическая модель электродинамических взаимодействий в электромеханической системе дуговой сталеплавильной электропечи / Л. П. Горева, Р. А. Бикеев, **Д. С. Власов** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2012. - № 6. - С. 46-49.
5. Электродинамические взаимодействия в дуговых сталеплавильных электропечах / Л. П. Горева, Р. А. Бикеев, **Д. С. Власов** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2012. - № 6. - С. 55-58.

**Список публикаций в других журналах, сборниках научных трудов, материалах международных и всероссийских научных конференций**

6. Program package for electrometallurgical installations reactance computation / A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, L.P. Goreva, **D.S. Vlasov**, P.V. Domarov // 13th International conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components ICEEE-2010. September 19-25, 2010. Alushta, Crimea, Ukraine. - Москва: Изд-во МЭИ.- 2010. - С.128.
7. Software complex to calculate inductances of secondary current contacts of electrotechnological installations / A.I. Aliferov, R.A. Bikeev, L.P. Goreva, **D.S. Vlasov**, P.V. Domarov // Proceedings of the XVII Congress "Energy Efficient, Economically Sound, Ecologically Respectful, Educationally Enforced Electrotechnologies", May 21-25, 2012 St. Petersburg. - С. Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. - С. 321-326.
8. Электромагнитные процессы в кольце гидроприжима электрода / В. А. Сериков, **Д. С. Власов** // Наука. Технологии. Инновации. Новосибирск, 29 ноября - 1 декабря 2012 г.: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых. - Новосибирск: НГТУ, 2012.
9. Исследование влияния магнитных масс на электрические параметры короткой сети мощных электротехнологических установок / В. А. Сериков, **Д. С. Власов** // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых 2-4

- декабря 2011г., в 6-ти частях. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. - Ч.2. - С. 66-67.
10. Моделирование электромагнитных процессов и расчет интегральных электрических характеристик систем токоподводов электротехнологических установок / А. И. Алиферов, Р. А. Бикеев, **Д. С. Власов**, Л. П. Горева, А. А. Мелешко // Инновационная энергетика 2010: материалы второй научно-практической конференции с международным участием, 10-12 ноября 2010 г. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - С. 209-211.
  11. Software complex to calculate inductances of secondary current contacts of electrotechnological installations / A. I. Aliferov, R. A. Bikeev, **D. S. Vlasov**, L. P. Goreva, P.V. Domarov // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10 "Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Electromagnetic Processing", Padua, May 18-21, 2010. - Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2010. - P. 107-111.
  12. Simulation of electromagnetic processes and calculation of integral electric parameters of electrotechnological installations current contact jaws systems / R. A. Bikeev, A. I. Aliferov, **D. S. Vlasov**, L. P. Goreva, N. M. Kabduliev // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-10 "Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Electromagnetic Processing", Padua, May 18-21, 2010. - Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2010. - P. 343-348.
  13. Ferromagnetic conductors electric resistances investigation under electrocontact heating / A. I. Aliferov, R. A. Bikeev, **D. S. Vlasov**, L. P. Goreva // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-2013 "Induction, dielectric and microwaves, conduction & electromagnetic processing", Padua, May 21-24, 2013. - Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2013. - P. 457-461.
  14. Research of influence of metal constructions of electric furnaces on electrical parameters of their current leads / A. I. Aliferov, Y. B. Tsoy, A. V. Blank, R. A. Bikeev, **D. S. Vlasov**, A. A. Meleshko // International Symposium on Heating by Electromagnetic Sources HES-2013 "Induction, dielectric and microwaves, conduction & electromagnetic processing", Padua, May 21-24, 2013. – Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2013. – P. 569-577.
  15. Research of influence of metal constructions of electric furnaces on their electrical parameters / A. Aliferov, R. Bikeev, **D. Vlasov** // The 8-th International Forum on Strategic Technology IFOST 2013, June 28- July 1. Ulaanbaatar, Mongolia. Proceedings. - Ulaanbaatar: Print & Publishing, Education Center, MUST, 2013. - Volume I. - P. 279-282.