*На правах рукописи*

Корытчинков Дмитрий Евгеньевич

# МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ГОРЕНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность: 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мусолин Александр Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Салихов Зуфар Гарифуллович

доктор технических наук, профессор Кузнецов Алексей Евгеньевич

Ведущая организация: ООО «Научно-техническая фирма «ЭКТА», г. Москва

Защита состоится «28» сентября 2011г. в 12 часов на заседании Диссертационного совета Д 212.211.02 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г.Рязань, ул.Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «26» августа 2011г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.211.02

кандидат технических наук, доцент А.И. Таганов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

***Актуальность работы.*** В литейном производстве для плавки различных марок стали, чугуна, алюминиевых, медных и других сплавов широко используются электродуговые печи, работающие на переменном или постоянном токе. Производительность и работоспособность электродуговых печей во многом зависит от способов, технических решений и программных средств системы управления процессом горения электрической дуги между электродами. Система управления процессом горения электрической дуги обеспечивает, во-первых, режимы плавки и, во-вторых, регулирование подводимой электрической энергии к электродам в зависимости от режима плавки.

В электродуговых печах постоянного тока (ЭДППТ) плавление металла происходит за счет процесса горения электрической дуги между подовым положительным электродом (анодом) и отрицательным графитовым подвижным электродом (катодом).

Теоретическими исследованиями по разработке систем управления технологическими процессами в электродуговых печах переменного тока посвящены труды ученых Дембовского В.В., Окорокова Н.В., Барского Б.С., Свенчанского А.Д., Салихова С.Г. и других отечественных и зарубежных ученых. Патентообладателем в России по дуговым печам постоянного тока является Малиновский В.С. Теоретические исследования и практическая реализация электродуговых печей постоянного тока нашли отражения в трудах Альферова В.И., Афонаскина А.В., Брона О.Б., Ярных Л.В. и других авторов.

Практическое исполнение ЭДППТ, кроме электродов, управляемого выпрямителя и системы управления, включает подвижный печной агрегат, токоподводящие кабели, перемещающиеся вместе с печным агрегатом и стальные несущие конструкции.

Токоподводящие кабели вокруг себя создают магнитное поле, определенной интенсивности и направления, которое влияет также на направление горения электрической дуги.

Кроме того, имеющиеся несущие стальные конструкции размещенные радом с печью, намагничиваются по мере возрастания числа плавок от магнитного поля, создаваемого токоподводящими кабелями.

Под воздействием магнитного поля происходит смещение направления горения электрической дуги (высокотемпературная плазма, состоящая из электронов, ионов и других заряженных частиц) в направлении, определяемом суммарным магнитным полем, что приводит к локальному перегреву и выжиганию части футеровки. В результате локального перегрева и последующего разрушения футеровки сокращается число плавок металла до восстановительного ремонта, и производительность печи снижается.

Ввиду сложности выявления влияния магнитных полей на направление горения электрической дуги в ЭДППТ в практическом их исполнении, целесообразно исследовать данные процессы с помощью методов математического моделирования.

Таким образом, актуальными являются исследования на основе математического моделирования, численных методов и комплексов программ, направленные на решение научно-технической задачи по созданию высокоэффективной системы управления направлением горения электрической дуги в электродуговой печи постоянного тока.

***Цель и задачи работы.*** Разработка методов и алгоритмов математического моделирования, численных методов и программных комплексов для исследования процессов электромагнитного управления направлением горения дуги в электродуговых печах постоянного тока, а также технических средств для управления дугой, с целью повышения производительности и безопасности работы печи при условии увеличения срока службы футеровочного корпуса.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие ***задачи***:

- анализ влияния магнитных полей на смещение дугового разряда в электродуговой печи постоянного тока;
- моделирование процесса движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях, анализ и тестирование результатов на модельных задачах на основе метода граничных элементов;
- разработка алгоритма расчета и моделирование магнитного поля совокупности электромагнитов (соленоидов), моделирование задач динамики движения потоков заряженных частиц в магнитном поле совокупности соленоидов;
- разработка метода и алгоритма моделирования и управления процессом движения электронов в магнитном поле электродуговой печи постоянного тока в условиях их столкновений с молекулами атмосферы;
- разработка технических средств и автоматизированных систем электромагнитного управления направлением горения дугового разряда в электродуговых печах постоянного тока на основе трех соленоидов.

***Методы исследования.*** Для решения поставленных задач использовались следующие методы исследований: численные методы, методы обработки экспериментальных данных, имитационное моделирование. Теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями, проведенными путем имитационного моделирования и натурных испытаний.

***Научная новизна работы*** определяется разработкой математических моделей описания процессов электромагнитного управления направлением горения дуги в электродуговых печах постоянного тока и созданием на основе этих моделей эффективных алгоритмов численного решения задач динамики потоков заряженных частиц в скрещенных электрическом и внешних магнитных полях электродуговой печи постоянного тока и разработка метода расчета траектории движения электронов в условиях столкновений с молекулами газа.

***Практическая значимость работы*** заключается в новых возможностях повышения производительности и безопасности заботы электродуговых печей постоянного тока за счет электромагнитного управления процессом горения дуги. Разработанные модели, алгоритмы, методы и структурные схемы системы

электромагнитного управления дугой позволяют решить практические задачи по конструированию соленоидов и управлению ими для электродуговых печей различных типов и объемов. Результаты экспериментальных исследований доказали принципиальные возможности управлением направлением горения дуги в печах постоянного тока с помощью электромагнитов и позволили увеличить число плавок до остановки на ремонт исследуемой печи в два раза за счет снижения износа футеровки печи.

Практические результаты получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы НИР №17-05 «Разработка и исследование автоматизированной системы управления направлением горения дуги в электродуговых печах», в которой автор являлся ответственным исполнителем.

***Внедрение научных результатов.*** Результаты диссертационной работы нашли применение в системе управления электродуговой сталеплавильной печью постоянного тока ДППТУ-20, емкостью 20 тонн, на предприятии ОАО «Тяжпрессмаш» г.Рязань, а так же в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета при изучении дисциплин «Моделирование систем», «Компьютерное моделирование», «Автоматизация технологических процессов и производств».

***Основные положения, выносимые на защиту:***

- алгоритм и результаты математического моделирования магнитного поля совокупности соленоидов, позволяющие исследовать траектории движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях электродуговой печи постоянного тока и возможности управления ими;
- результаты моделирования численного решения задач управления движением заряженных частиц в электромагнитном поле и параметров магнитного поля совокупности соленоидов, с возможностью контроля точности, тестирование методики расчета решения внешней задачи Дирихле с помощью метода граничных элементов на системах с аналитическими решениями, позволяющий повысить на порядок точность вычислений;
- метод и алгоритм математического моделирования движения электронов в магнитном поле электродуговой печи в условиях их столкновений с молекулами атмосферы;
- метод построения автоматизированных систем электромагнитного управления направлением горения дугового разряда в электродуговой печи постоянного тока на основе трех соленоидов, позволяющий увеличить число плавок в два раз за счет снижения температурного износа футеровки.

***Соответствие паспорту специальности:***

Согласно паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» проблематика рассмотренная в диссертации, соответствует следующим областям исследований:

- Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

- Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

***Апробация работы.*** Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях:

- Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях «Новые технологии в учебном процессе и производстве», г.Рязань, Рязанский институт МГОУ, 2006, 2007г.г.;

- 15-я и 16-я Международные научно-технические конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», г.Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет, 2008, 2010г.г.;

- XIV-я и XV-я Всероссийские научно-технические конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании», г.Рязань, Рязанский государственный радиотехнический университет, 2009, 2010г.г.;

- X Конгресс «Кузнец-2010». Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. г.Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2010.

***Структура и объем работы.***

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа содержит 167 страниц основного текста, включая 71 рисунок, 1 таблицу, а также список литературы из 67 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность избранной темы и определены: задача, цель и вопросы исследования; раскрыты принципы используемых подходов и методик; показана научная новизна и практическая значимость диссертации, сформулированы выносимые на защиту положения; приведены апробации результатов исследования в реальных условиях работы электродуговой печи постоянного тока.

**В первой главе диссертационной работы** рассматривается работа электродуговых печей постоянного тока, определяется причина разрушения футеровки в связи с отклонением направления горения дуги, вследствие влияния внешнего магнитного поля. Собраны экспериментальные данные на сталеплавильной печи постоянного тока ДППТУ-20 ОАО «Тяжпрессмаш», г.Рязань.

Схема расположения оборудования с контрольными точками 1-8 измерения индукции магнитного поля после 25 плавок приведена на рисунке 1.

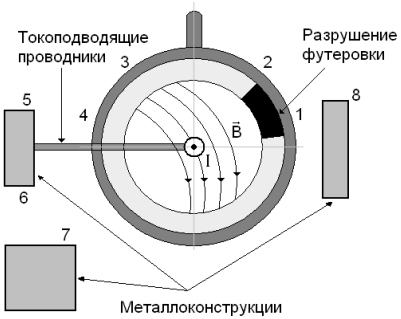



**Рисунок 1.** Схема сталеплавильной печи ДППТУ-20 (вид сверху)

Анализ экспериментальных данных и особенностей конструкции сталеплавильной печи показывает, что источником локального разрушения футеровки являются неравномерные тепловые нагрузки на стенки печи из-за отклонения дуги от оси симметрии, возникающие под действием магнитного поля, создаваемого системой подвода электроэнергии. Эта система, по сути, представляющая собой в упрощенном виде два проводника с током – нижний проводник, по которому ток *I* втекает в печь, и верхний, по которому происходит отвод тока *I*. Указанные проводники создают во внешнем пространстве, в том числе в объеме печи, магнитное поле с индукцией $\vec{B}$. Данное поле приводит к появлению силы Ампера ($\vec{F}_A$), действующей на дуговой разряд как на проводник с током *I* и стремящейся сместить дугу в сторону, противоположную от токоподводящих проводов. Расчеты, произведенные на основе закона Био-Саварра-Лапласа показывают, что величина индукции магнитного поля *B*, создаваемого горизонтальными токоподводящими проводниками при величине рабочего тока в технологическом режиме *I*=30 кА, составляет порядка 10 мТл.

Результаты аналитических расчетов индукции магнитного поля уточнялись данными, полученными экспериментальным путем.

Экспериментальные измерения показали наличие индукции магнитного поля $B_0$ в пространстве вблизи печи во время плавок, создаваемого токоподводящими проводниками (см. рисунок 1 и таблица 1). Величины измеренной в контрольных точках индукции магнитного поля с точностью 20% соответствует приведенным расчетным значениям (см. значение $B_0$ в точке 4).

**Таблица 1.** Значение индукции $B_0$ магнитного поля во время работы печи

| Точка измерения | Значение индукции, мТл. |
|---|---|
| 1 | 1,51 |
| 2 | 1,65 |
| 3 | 2,08 |
| 4 | 5,3 |

Результаты измерений подтверждают справедливость указанных ранее причин отклонения дуги под воздействием внешнего статического магнитного поля печи. Зная место разрушения футеровки (направление отклонения дуги), направление течения тока (противоположное потоку электронов), по правило левой руки можно указать направление вектора магнитной индукции (индукция показана на рисунке 1 силовыми линиями).

Кроме того, дополнительный вклад в смещение дуги вносит и воздействие дополнительных источников внешнего магнитного поля. Во время восстановления футеровки (печь остановлена) проведена серия измерений с целью получения данных о величине индукции магнитного поля, возникающего из-за намагничивания внешних металлоконструкций, расположенных рядом со сталеплавильной печью. Результаты измерений приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Значение индукции $B_0$ магнитного поля, создаваемого внешними металлоконструкциями дуговой печи

| Точка измерения | Значение индукции, мТл. |
|---|---|
| 5 | 1,05 |
| 6 | 2,3 |
| 7 | 1,3 |
| 8 | 0,3 |

Из представленных результатов измерений следует, что расположенные вблизи токоподводящих кабелей металлоконструкции сильно намагничиваются и дополнительно воздействуют на форму и положение дуги.

**Во второй главе** предлагается численное решение задачи динамики потоков заряженных частиц в электрическом и магнитных полях.

Одним из положительно зарекомендовавших себя средств анализа поведения заряженных частиц в электромагнитных полях является комплекс программ «ФОКУС». Модуль позволяет сформировать с помощью графического редактора систему электродов с подачей на них соответствующих потенциалов. Процедура позволяет провести вычисление множества траекторий заряженных частиц, имеющих начальную энергию. На рисунке 2 в качестве примера приведены траектории заряженных частиц, движущихся в статическом электрическом поле.

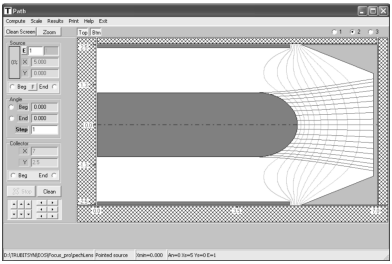



**Рисунок 2.** Модуль траекторного анализа системы с электростатическим полем

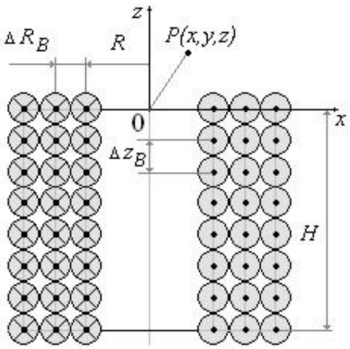



**Рисунок 3.** Сечение соленоида

В основе работы большого класса приборов для научных исследований и промышленных установок разного назначения лежат процессы взаимодействия потоков заряженных частиц с веществом в различных агрегатных состояниях. При этом важной самостоятельной научной и технической задачей является задача управления параметрами таких потоков, которое осуществляется воздействием на них магнитных или электрических полей определенной конфигурации. Одним из основных технических источников магнитного поля в отсутствие ферромагнетиков является соленоид как совокупность простейших круговых токов (Рисунок 3).

Поле соленоида, верхнее основание которого лежит в плоскости $x0y$, а ось совпадает с координатной осью $0z$, может быть вычислено как двойная сумма по количеству слоев и витков в каждом слое

$$\vec{\boldsymbol{B}}_S\left(x,y,z\right)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}\vec{\boldsymbol{B}}_{kj}\left(x,y,z_j\right),$$

где составляющие магнитного поля $\vec{\boldsymbol{B}}_{kj}$ каждого витка по осям.

Очевидно, что для случая нескольких соленоидов вычисление магнитного поля $\vec{\boldsymbol{B}}$ производится суммированием составляющих индукции $\vec{\boldsymbol{B}}_S$, или в краткой форме

$$\vec{\boldsymbol{B}}(x,y,z)=\sum_{S}\vec{\boldsymbol{B}}_S(x,y,z).$$

В качестве демонстрации на рисунке 4 представлены картины магнитного поля трех соленоидов, оси которых лежат в плоскости $y0z$ и расположены под углом $120^0$ друг к другу.

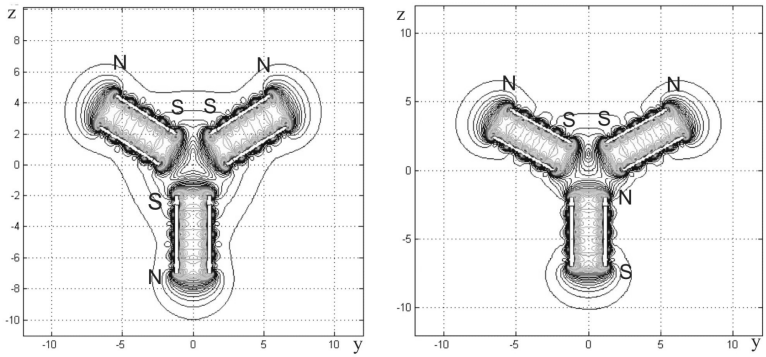



**Рисунок 4.** Картина линий уровня магнитного поля трех соленоидов с различной ориентацией полюсов

Для автоматизации решения задач анализа магнитных полей, создаваемых совокупностью соленоидов, разработан и внедрен в программу «ФОКУС» модуль Field_M, который позволяет провести вычисление магнитного поля до 10 соленоидов. Каждый соленоид идентифицируется величиной тока I обмотки, длиной, количеством витков в одном слое намотки на длине соленоида, внутренним и внешним радиусами, количеством слоев намотки, координатами центра верхнего основания соленоида, углами, задающими ориентацию его оси в пространстве.

Модуль обеспечивает вычисление и индикацию величин составляющих $B_X$, $B_Y$, $B_Z$ индукции магнитного поля в любой точке анализируемого пространства с координатами X, Y, Z; визуализацию картины распределения этих величин в плоскостях, параллельных x0y, y0z и x0z.

Проведено исследование возможностей и особенностей применения программы «ФОКУС», детально исследованы величина и характер вычислительных погрешностей программы. Проведено моделирование электрических и магнитных полей, проанализированы и протестированы результаты на модельных задачах.

Разработан алгоритм и проведено моделирование магнитного поля совокупности соленоидов для управления направлением горения электрической дуги.

Проведено тестирование методики расчета решения внешней задачи Дирихле с помощью метода граничных элементов на системах с аналитическими решениями, позволившее сделать вывод о достижимости практически любого заданного уровня точности, ограниченного лишь ошибками округления и временными ресурсами пользователя:

- гарантирования точность вычисления потенциала составляет ~ $10^{-4}$-$10^{-3}$ %;
- погрешность вычислений компьютерного моделирования с прямолинейными сечениями электродов лимитирована лишь ошибками округления;

- погрешность расчетов компьютерного моделирования с криволинейными электродами определяется точностью аппроксимации границы прямолинейными отрезками и не превышает в описываемой программной реализации ~ $10^{-3}$ %.

**В третьей главе** исследуются алгоритмы вычисления траекторий заряженных частиц, предлагаются способы воздействия на электрическую дугу в электродуговой печи постоянного тока.

Начальные условия задачи имеют вид

$$x(t_0)=x_o,\ y(t_0)=y_0\ ,\ z(t_0)=z_0\ ,$$

$$V_{x0}=\sqrt{\frac{2E_0}{m}}\cos\alpha\cos\gamma\ ,\ V_{y0}=\sqrt{\frac{2E_0}{m}}\cos\alpha\sin\gamma\ ,$$

$$V_{z0}=\sqrt{\frac{2E_0}{m}}\sin\alpha\ .$$

где $E_0$ - начальная энергия частицы; $\alpha$ и $\gamma$ – начальный полярный и азимутальный углы движения частицы; $V_{x0}$ , $V_{y0}$ , $V_{z0}$ - векторные составляющие начальной скорости.

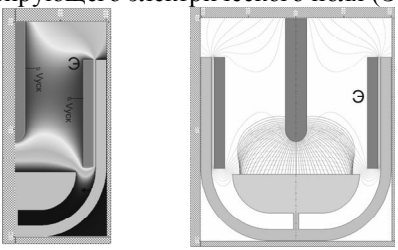
Наиболее распространенный алгоритм численного решения системы дифференциальных уравнений движения основывается на методе Рунге-Кутта. При шаге интегрирования, стремящемся к нулю, классический и наиболее часто используемый метод Рунге-Кутта четвертого порядка согласуется с рядом Тейлора асимптотически до четвертого порядка малости. К достоинствам метода следует отнести принципиальную возможность обеспечения уровня точности, диктуемой современными требованиями к качеству проектируемых систем; простоту алгоритмизации, численную устойчивость; самостартуемость, в отличие от методов прогноза-коррекции, и возможность изменения шага интегрирования на любой стадии вычислений.

В настоящей работе алгоритм адаптирован к решению системы уравнений движения заряженных частиц методом Рунге-Кутта-Фельберга. Тестирование алгоритма на задачах с аналитическими решениями показало значительное увеличение точности расчетов (по сравнению с методом Рунге-Кутта) на каждом шаге интегрирования (более чем на порядок) при возрастании в среднем общей скорости счета приблизительно в 5-10 раз с учетом обеспечения гарантий требуемой погрешности. Сказанное позволяет сделать вывод о несравнимо более высоких характеристиках метода Рунге-Кутта-Фельберга по сравнению со стандартным методом Рунге-Кутта и исключительной предпочтительности его использования, например, в задачах траекторного анализа.

Модуль трехмерного отображения траектории заряженной частицы при ее движении в электромагнитном поле позволил упростить процедуру ввода-вывода данных и визуализацию движения заряженных частиц.

Логически обоснованной идеей возможного способа изменения конструкции печи с целью обеспечения транспортировки электронного потока в

место расплава металла является размещение в области корпуса дополнительного фокусирующего электрического поля (Э) (рисунок 5).




(a) (b)

**Рисунок 5.** Результаты моделирования электрического поля (a) и траекторий электронов (b) в печи с дополнительным фокусирующим электрическим полем (Э)

В тех случаях, когда использование дополнительного электрического фокусирующего поля является невозможным или нецелесообразным, физически реализуемым способом разрешения проблемы может стать известный способ наложения магнитного поля, параллельного оси симметрии. Указанный способ широко используется в ускорительной технике заряженных частиц. Численный анализ токопрохождения в печи показал возможность транспортировки электронного потока, являющегося, как уже было отмечено, основным фактором возбуждения дуги, строго на расплав металла за счет наложения магнитного поля соленоида, располагаемого соосно с печью (рисунок 6).

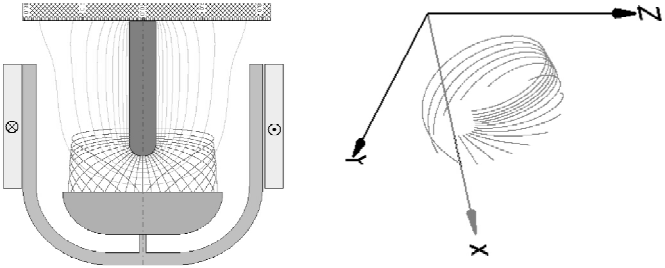



**Рисунок 6.** Результаты траекторного анализа плавильной печи с наложенным магнитным полем соосно расположенного соленоида

Однако схема соосного размещения соленоида, несмотря на кажущуюся простоту, является малопригодной для практической реализации вследствие конструктивных особенностей печи. По этой причине далее рассматриваются и исследуются альтернативные варианты возбуждения магнитного поля в области возникновения дуги. Наиболее приемлемым с практической точки зрения оказывается способ, использующий три одинаковых соленоида с осями, перпендикулярными оси симметрии *0x* печи, угол между которыми составляет $120^0$. На рисунке 7 представлена схема взаимного расположения соленоидов и плавильной печи.

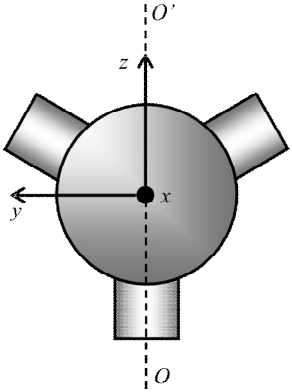



**Рисунок 7.** Схема взаимного расположения печи и трех соленоидов

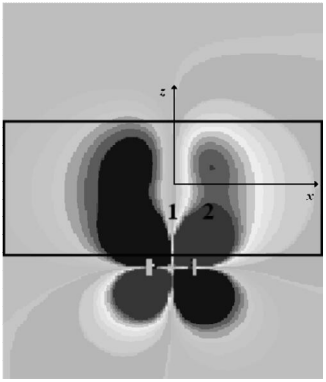



**Рисунок 8.** Картина магнитного поля в сечении *OO'* системы

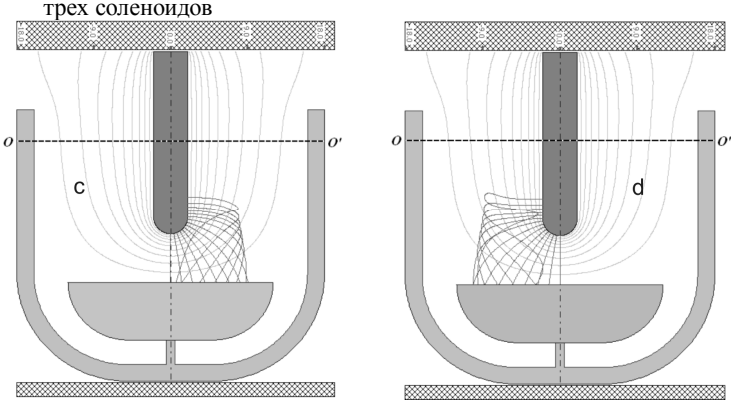



**Рисунок 9.** Результаты траекторного анализа плавильной печи с наложенным магнитным полем трех соленоидов, оси которых перпендикулярны оси симметрии системы

Разработан и протестирован алгоритм вычисления траекторий заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях на основе метода Рунге-Кутта-Фельберга, в том числе с контролем точности вычислений. Показано, что применение алгоритма позволяет улучшить на порядок погрешность расчетов при многократном увеличении скорости счета в режиме контроля точности по сравнению со стандартным методом Рунге-Кутта. Компьютерное моделирование движение электронов в электрическом поле электродуговой печи показало, что при определенных положениях катодного пятна эмиссии электронов появляется возможность возбуждения паразитного дугового разряда между катодом и футеровочным корпусом, приводящего к разрушению последнего. Исследования с помощью компьютерного моделирования предложенных методов исключения возможности возникновения паразитного дугового разряда между катодом и футеровочным корпусом печи на

основе применения фокусирующего электрического поля или наложением на печь вертикального внешнего магнитного поля или магнитного поля трех локальных соленоидов показали, что целесообразно использовать для практической реализации метод выполненный на основе трех соленоидов.

**В четвертой главе** проводится моделирование движения электронов в ванне печи постоянного тока, с учетом процессов столкновения электронов с молекулами атмосферного воздуха. Разрабатывается метод и алгоритм расчета траектории движения электронов в условиях столкновений с молекулами газа.

Горение дугового разряда сопровождается сложными физическими процессами столкновений электронов с молекулами атмосферного воздуха. Для исследования механизмов и степени влияния различных внешних факторов, например, магнитных полей на пространственное расположение дуги в рабочей области печи необходимо провести моделирование прохождения электронов как первопричин возникновения разряда в условиях их столкновений с молекулами атмосферного воздуха.

Численные методы определения макропараметров некоторого процесса по известным микропараметрам базируются на методе Монте-Карло, суть которого заключается в разыгрывании этих микропараметров и проведении большого количества статистических испытаний.

Длина свободного пробега электрона как среднее расстояние, проходимое им между двумя последовательными столкновениями с молекулами газа, в первом приближении может быть оценена по формуле

$$\lambda_0 = \frac{4kT}{\pi P d^2},$$

где P – давление газа, k – постоянная Больцмана, T – температура газа, d – диаметр молекулы.

Поскольку длина свободного пробега является величиной, обратно пропорциональной вероятности столкновения, то зависимость длины свободного пробега от энергии может быть аппроксимирована функцией

$$\lambda_E = \lambda_0 \cdot g(E),$$

где $g(E) = \begin{cases} 3 - E, 0 \le E < 2, \\ 1 + ln(E-1), E \ge 2. \end{cases}$

Для проведения статистических испытаний длину свободного пробега следует считать случайной величиной, распределенной в интервале (0,∞) с плотностью вероятностей

$$f(\lambda) = He^{-H\lambda},$$

где $H$ – полное сечение взаимодействия.

Вероятность попадания непрерывной случайной величины $\lambda$ в интервал $(0,\lambda)$ равна

$$r = \int_0^{\lambda} f(x)dx = \int_0^{\lambda} He^{-Hx}dx = -e^{-Hx}\Big|_0^{\lambda} = 1 - e^{-H\lambda}.$$

Откуда следует, что $-H\lambda = ln(1-r)$. Здесь по смыслу ***r*** – случайная величина, равномерно распределенная в интервале (0,1). Поскольку в таком случае (1-***r***) распределена так же, как и ***r***, то можем записать

$$\lambda = -\frac{1}{H} ln\, r.$$

Математическое ожидание

$$M\lambda = \lambda_E = \int_0^{\infty} \lambda f(\lambda)d\lambda = \int_0^{\infty} \lambda He^{-H\lambda}d\lambda = -\lambda e^{-H\lambda}\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} e^{-H\lambda}d\lambda =$$

$$= -\frac{e^{-H\lambda}}{H}\Big|_0^{\infty} = \frac{1}{H}.$$

Таким образом, окончательная формула разыгрывания длины свободного пробега приобретает вид

$$\lambda = -\lambda_E\, ln\, r.$$

Здесь и далее ***r*** – конкретное значение равномерно распределенного числа в интервале [0,1], полученное в ходе статистического испытания.

Столкновения электронов с молекулами могут иметь упругий и неупругий характер. При упругом соударении меняются направления движения взаимодействующих частиц и их скорости, происходит обмен импульсами и кинетическими энергиями, но внутренняя энергия частиц остается неизменной. При неупругом ударе внутренняя энергия и состояние молекулы изменяются.

Для организации вычислений прохождения электронов, возбуждающих дуговой разряд, в электромагнитном поле печи в условиях взаимодействий с молекулами газа задаются давление *(P)* и температура *(T)* газа и газокинетический диаметр молекулы *(d)*. Определяется длина свободного пробега *($\lambda_0$)* в газокинетическом приближении и запускается процесс моделирования траектории.

Вычисление каждого участка начинается с определения значения длины свободного пробега электрона по текущему значению его кинетической энергии *(E)* и статистическом разыгрывании конкретного значения длины свободного пробега в данном испытании. В ходе вычислений при превышении длины траектории *l* на рассматриваемом участке длины свободного пробега $\lambda$ пропорционально уменьшается шаг интегрирования *dT* по времени до $dT_{last}$ на последнем интервале интегрирования, проводится интегрирование с полученным шагом $dT_{last}$ (см. рисунок 10), после чего считается произошедшим столкновение электрона с молекулой.

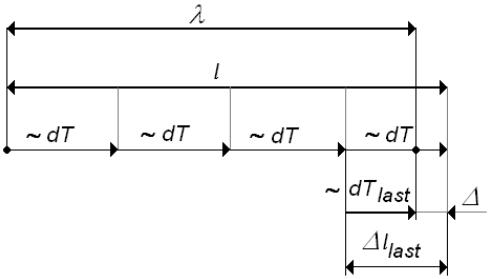



**Рисунок 10.** Определение последнего шага интегрирования перед столкновением:

$$dT_{last} = dT\frac{\Delta l_{last} - \Delta}{\Delta l_{last}}, \text{ где } \Delta = l - \lambda$$

Далее определяется характер столкновения – упругий, или неупругий. Для упругих столкновений определяется угол рассеяния $\varphi$ и составляющие скорости электрона после взаимодействия с молекулой. Для неупругих столкновений определяется угол рассеяния $\varphi$, энергия и составляющие скорости электрона после взаимодействия с молекулой. Затем процесс вычисления следующего участка траектории повторяется вновь.

Описанный алгоритм положен в основу программного модуля по моделированию токопрохождения в условиях взаимодействия электронов с молекулами газовой среды. Модуль интегрирован в приложение ФОКУС.

На рисунке 11 представлены результаты моделирования траекторий электронов при различных значениях давления атмосферы в объеме плавильной печи. Начальные условия задачи задавались реальными экспериментально установленными параметрами. С учетом катодного падения потенциала (~10 В) на расстоянии, приблизительно равном длине свободного пробега (~$10^{-10}$ м), и температуры катода 3000-3500 $^0$С (~1 эВ) устанавливалась начальная энергия электронов при их эмиссии непосредственно с поверхности (и перпендикулярно ей) катода $E$=11 эВ. При этом напряжение между катодом и анодом принималось равным 90 В, что с учетом катодного падения потенциала соответствовало реально поддерживаемому в установке напряжению 100 В. Температура газовой среды задавалась равной 1000 $^0$С.

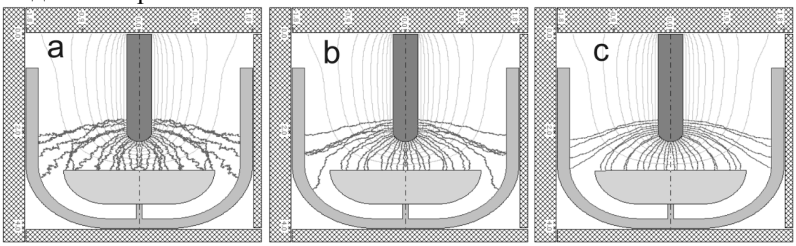



**Рисунок 11.** Траектории электронов при различных давлениях газовой среды:
(a) $P=P_{атм}/100$, (b) $P=P_{атм}/10$, (c) $P=P_{атм}$
Атмосферное давление $P_{атм}=10^5$ Па

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что эффект рассеивания электронного потока электрическим полем печи, исследованный в условиях вакуума, сохраняется и при движении электронов в газовой среде при возбуждении разряда. Данный эффект является одной из причин пространственной нестабильности и смещения дуги от центральной области расплава металла к ее границе.

Исключение эффекта рассеивающей линзы с целью стабилизации положения газового разряда, может быть достигнуто наложением магнитного поля вдоль оси симметрии системы. На рисунке 12 представлены результаты траекторного анализа системы при различных давлениях газовой среды и осевого магнитного поля. При этом фокусировка электронного потока в область расплава металла в зависимости от давления газа достигается при различных значениях индукции магнитного поля, чем больше давление, тем больше необходимая величина фокусирующего магнитного поля.

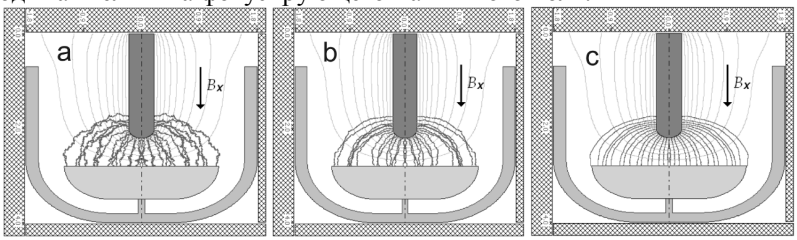



**Рисунок 12.** Фокусировка электронных потоков магнитным полем при различных давлениях газовой среды:
(a) $P=P_{атм}/100$, $B_x$=1 мТл; (b) $P=P_{атм}/10$, $B_x$=3 мТл; (c) $P=P_{атм}$, $B_x$=10 мТл

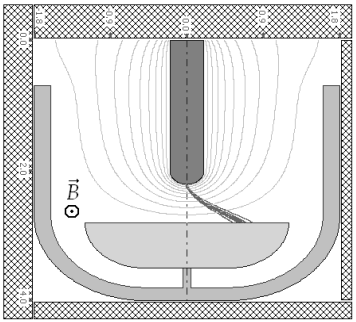



**Рисунок 13.** Прохождение электронов, эмитированных из катодного пятна, в условиях столкновений с молекулами атмосферного воздуха и наложении внешнего магнитного поля B=10 мТл

Однако основной причиной смещения дуги является внешнее магнитное поле перпендикулярное оси симметрии печи, создаваемое системой электрического питания и намагниченными металлоконструкциями.

На рисунке 13 представлены результаты траекторного анализа конструкции печи при давлении атмосферного воздуха и наложении перпендикулярно оси симметрии системы внешнего магнитного поля с

индукцией 10 мТл. Результаты моделирования на строгой экспериментально-теоретической базе подтверждают сделанные выводы.

**В пятой главе** разработана система управления направлением горения дуги на базе трех соленоидов и приведены результаты экспериментального применения разработанной системы управления направлением горения дуги в электродуговой печи постоянного тока ДППТУ-20 ОАО «Тяжпрессмаш», г.Рязань.

По результатам компьютерного моделирования и экспериментальных работ, проведенных при выполнении проекта, были выработаны рекомендации по введению изменений в конструкцию дуговой сталеплавильной печи и способа ее электропитания, касающиеся создания и регулирования компенсирующего магнитного поля с целью управления положением дуги в различных режимах плавки.

С целью возбуждения магнитного поля с составляющей по оси симметрии системы, обеспечивающего фокусировку электронного потока на расплав металла и пространственную устойчивость горения дуги, необходимо размесить на корпусе печи три соленоида, угол между осями которых составляет $120^0$ (рисунок 14).

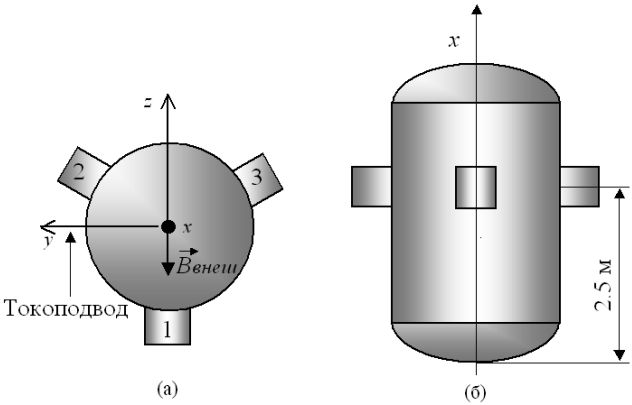



**Рисунок 14.** Расположение соленоидов (1, 2, 3) на корпусе печи:
а - вид сверху, б – профиль

Для установки требуемых величины и направления компенсирующего магнитного поля в различных режимах работы сталеплавильной печи (плавление шихты, окисление, восстановление) питание соленоидов осуществлять от управляемых от ПЭВМ источников тока с диапазоном регулировки от 1 до 20 А (схема питания соленоидов показана на рисунке 15).

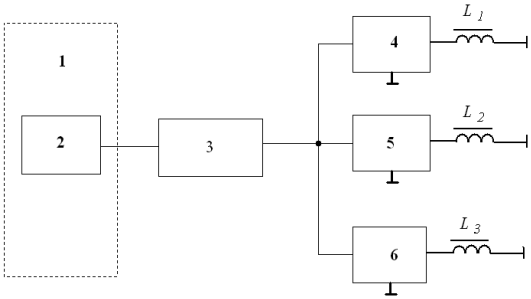



**Рисунок 15.** Схема управления соленоидами сталеплавильной печи.
1 – операторская, 2 – ПЭВМ, 3 – линия связи, 4, 5, 6 – управляемые от ПЭВМ источники тока, $L_1$, $L_2$, $L_3$ – соленоиды

Статистические результаты экспериментов приведены на рисунке 16 в виде диаграммы, показывающей число плавок между ремонтными работами по восстановлению футеровки печи, полученных при отсутствии и наличии компенсирующего магнитного поля, создаваемого соленоидами.

Плавки в экспериментах 1, 2, 3 проводились в обычных условиях при отключенных соленоидах в отсутствии дополнительного магнитного поля. Как видно из диаграммы число плавок, проведенных без ремонта защитного теплоизоляционного слоя стен печи не превышало 35. При подключении соленоидов число плавок без ремонта возросло до 55. Причем количество бесперебойных плавок в эксперименте постепенно возрастало, что свидетельствует о том, что дополнительное поле компенсирует магнитное поле не только подводящих проводников, но и магнитное поле от намагниченных стальных конструкций печи. При отключении соленоидов (эксперимент 8) число плавок безремонтной работы снова сократилось до 40.

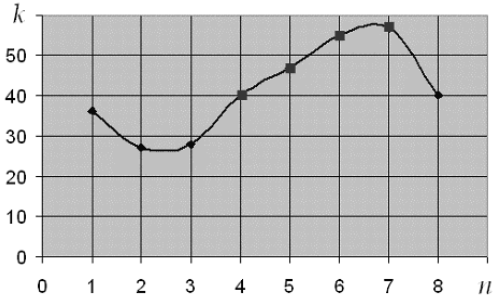



**Рисунок 16.** Количество плавок *k* в эксперименте *n*

Характер представленных данных позволяет сделать вывод об увеличении в 1.5-2 раза количества плавок без ремонтных работ при наложении компенсирующего магнитного поля размещенных на внешней поверхности печи соленоидов. Данный результат является положительным решением поставленной в проекте задачи об увеличении срока (количества плавок) безостановочной работы печи. Дополнительный эффект можно получить при оптимизации

расположения соленоидов и величины магнитной индукции компенсирующего поля.

**Заключение и выводы.** На основании выполненных исследований осуществлено впервые решение актуальной научно-технической задачи по разработке технических средств, методов, алгоритмов и комплексов программ математического моделирования и решения численных задач по электромагнитному управлению направлением горения дуги на основе трех соленоидов в электродуговых печах постоянного тока для повышения их производительности и безопасности работы, при условии увеличения срока службы футеровочного корпуса.

В ходе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что локальное выгорание футеровочного корпуса происходит за счет смещения дугового разряда в электродуговой печи постоянного тока из-за наличия вокруг печи статического внешнего магнитного поля, создаваемого подводимыми токовыми проводниками и массивной металлической конструкции печи.
2. Проведено моделирование электрических и магнитных полей, проанализированы и протестированы результаты на модельных задачах на основе использования комплекса программ «ФОКУС». Проведено тестирование методики расчета решения внешней задачи Дирихле с помощью метода граничных элементов на системах с аналитическими решениями, позволившее сделать вывод о достижимости практически любого заданного уровня точности (гарантирования точность вычисления потенциала составляет ~ $10^{-4}$-$10^{-3}$ %). Разработан алгоритм и программное приложение для моделирования магнитного поля совокупности соленоидов.
3. Разработан и протестирован алгоритм вычисления траекторий заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях на основе метода Рунге-Кутта-Фельберга, в том числе с контролем точности вычислений, позволяющий улучшить на порядок погрешность расчетов при многократном увеличении скорости счета в режиме контроля точности по сравнению со стандартным методом Рунге-Кутта.
4. Проведено моделирование движения заряженных частиц в электромагнитных полях электродуговой печи постоянного тока, позволяющее исследовать траектории движения электронов между электродами при наличии в электродуговой печи фокусирующего электрического поля, стабилизирующего положение дугового разряда или при наложении на печь внешнего магнитного поля или полей трех локальных соленоидов, позволяющих управлять направлением горения дугового разряда.
5. Разработан метод, алгоритм и программное приложение для моделирования движения электронов в электромагнитном поле электродуговой печи в условиях их столкновений с молекулами атмосферы, позволяющий исследовать механизмы и степени влияния внешних электрических и магнитных полей на пространственное расположение разряда.

6. Разработаны варианты построения автоматизированных систем электромагнитного управления направлением горения дугового разряда в электродуговой печи постоянного тока.
7. Спроектирована, изготовлена и протестирована система электромагнитного управления направлением горения дугового разряда в электродуговой печи постоянного тока на основе трех соленоидов, позволяющая увеличить число плавок в два раза за счет снижения температурного износа футеровочного корпуса.

***Публикации.***

Основное содержание диссертации отражено в 15-ти опубликованных работах, в том числе 3 статьи в ведущих журналах, утвержденных ВАК.

1. Мусолин А.К., Сорокин А.В., Пашкин Р.Н., Корытчинков Д.Е. Автоматический контроль управляемого выпрямителя для сталеплавильной печи. // Новые технологии в учебном процессе и производстве. Четвертая межвузовская научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский институт МГОУ, 2006.
2. Мусолин А.К., Лашин В.А., Синицын И.Е., Корытчинков Д.Е. Методы и средства управления горения дуги в сталеплавильной печи. // Новые технологии в учебном процессе и производстве. Четвертая межвузовская научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский институт МГОУ, 2006.
3. Мусолин А.К., Корытчинков Д.Е., Лашин В.А., Синицын И.Е., Молчанов С.Н. Результаты экспериментальных исследований по управлению направлением горения дуги в электродуговых печах. // Новые технологии в учебном процессе и производстве. Пятая межвузовская научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский институт МГОУ, 2007.
4. Окрут А.А., Корытчинков Д.Е., Гаврилов Н.Л. Автоматизированное управление и контроль параметров плавки в электродуговой печи постоянного тока. // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Пятнадцатая международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2008.
5. Корытчинков Д.Е., Трубицын А.А., Дягилев А.А. Численное моделирование магнитного поля соленоида. // Вестник РГРТУ. №3 (выпуск 25). – Рязань, 2008.
6. Корытчинков Д.Е., Трубицын А.А., Жулева С.Ю. Алгоритм моделирования магнитного поля совокупности произвольно ориентированных соленоидов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – №3, вып.60, 2008.
7. Корытчинков Д.Е. Управление положением горения дугового разряда в электродуговой плавильной печи постоянного тока. // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. XIV–я Всероссийская научно-техническая конференция: Материалы

конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2009.

8. Трубицын А.А., Гуров В.С., Корытчинков Д.Е. Алгоритм решения уравнений движения заряженной частицы в электромагнитном поле методом Рунге-Кутта-Фельберга с контролем точности вычислений // Межвузовский сборник научных трудов «Электроника».– Рязань, РИЦ РГРТУ.- 2009.
9. Кирюшин Д.В., Корытчинков Д.Е., Трубицын А.А. Исследование возможности модернизации печей дуговой плавки // Тезисы докладов девятого Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». – Москва, ГНЦ РФ ФГУП НПО «Орион», 2009.
10. Корытчинков Д.Е. Моделирование движения электронов в электромагнитном поле плавильной печи постоянного тока. // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций. Шестнадцатая международная научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010.
11. Корытчинков Д.Е. Моделирование и управление положением горения разряда в электродуговой плавильной печи постоянного тока. // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. XV–я Всероссийская научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010.
12. Корытчинков Д.Е. Способы управления положением горения дугового разряда в электродуговой печи постоянного тока. // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. XV–я Всероссийская научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010.
13. Синицын И.Е., Корытчинков Д.Е. Система управления технологическим процессом формированием магнитного поля для автоматической стабилизации направления горения дуги в электродуговой сталеплавильной печи. // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании. XV–я Всероссийская научно-техническая конференция: Материалы конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2010.
14. Корытчинков Д.Е. Управление положением горения дугового разряда в электродуговой плавильной печи постоянного тока. // X Конгресс «Кузнец-2010». Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2010.

15. D.V. Kiryushin, D.E. Korytchinkov, D.V. Suvorov, A.A. Trubitsyn, V.N. Shurikoy. Numerical Model of Motion of Electron in Gas // Eurasian Physical Technical Journal. Vol. 7, № 2(14), 2010.

Корытчинков Дмитрий Евгеньевич

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЕМ ГОРЕНИЯ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность: 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24 августа 2011 г.
Формат бумаги 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать ризографическая. Тираж 100 экз. Заказ № 4854
Отпечатано ИП Панкин М.Н.
390035, г. Рязань, ул. Полетаева, д.28, кв. 23