

На правах рукописи

МАНАГАРОВ Владимир Николаевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВАХ  
(НА ПРИМЕРЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА)**

05.13.18 – математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2009

Работа выполнена на кафедре вычислительной техники и прикладной математики Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Ячиков Игорь Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
Потапов Виктор Иванович;  
  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кузнецов Виктор Алексеевич.

Ведущая организация: Уральский государственный  
технический университет – УПИ.

Защита диссертации состоится 8 апреля 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.14 по присуждению ученых степеней при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 5 марта 2009 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Соколинский Л.Б.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Основу современной металлургии составляют электродуговые печи. Огромный вклад по совершенствованию их конструкции и технологии внесли такие российские исследователи, как Афонаскин А.В., Зинуров И.Ю., Кузнецов Л.К., Малиновский В.С., Никольский Л.Е., Окороков Н.В., Рошин В.Е., Сойфер В.М., Строганов А.И. и др.

Основной задачей выплавки металла в дуговых печах является повышение его качества. Мощные дуговые сталеплавильные печи переменного тока (ДСП) используются как агрегат для получения расплава, при этом доводка металла происходит в установках печь-ковш. В малой металлургии применяются дуговые печи постоянного тока (ДППТ), которые чаще всего являются агрегатами полного цикла, включающими окислительный и восстановительный периоды. Качество выплавляемого в них металла полностью определяется технологией выплавки.

Продолжительность восстановительного периода, достижение химической и температурной однородности расплава зависит от его перемешивания. Особенностью работы ДППТ является то, что при прохождении электрических токов через расплав возникают электровихревые течения (ЭВТ), которые оказывают существенное влияние на его перемешивание и, в конечном итоге, на качество выплавляемых металлов и сплавов.

В настоящее время на ряде российских и зарубежных предприятий используется технология перемешивания расплава в ванне посредством ЭВТ. При ее использовании в ДППТ устанавливают один осевой графитированный электрод и не менее двух подовых электродов. Данная технология позволяет производить эффективное перемешивание без использования внешнего индуктора. Однако ЭВТ, возникающие в ванне расплава, исследованы недостаточно. Остаются малоизученными факторы, влияющие на характер ЭВТ, в частности, влияние размера и расположения подовых электродов на возникновение «застойных» зон.

Изучение ЭВТ на реально действующих печах и модельных установках осложнены наличием высоких температур, химической агрессивностью среды или использованием ядовитой ртути. Разработкой теории ЭВТ в разное время занимались ряд отечественных исследователей: Бояревич В.В., Власюк В.Х, Горбачев Е.В., Дементьев С.Б., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Фрейберг Я.Ж., Чудновский А.Ю., Щербинин Э.В., Яковлева Е.Е. и др.

Физической основой ЭВТ являются объемные электромагнитные силы (ОЭМС), обусловленные взаимодействием электрического тока, подводимого к расплаву от стороннего источника ЭДС, с его собственным магнитным полем. Знание распределения ОЭМС позволит определить характер ЭВТ в ванне расплава ДППТ. В настоящее время, наиболее приемлемым способом изучения ОЭМС является математическое моделирование.

**Цель и задачи работы.** *Целью* диссертационной работы является разработка математической модели распределения ОЭМС и исследование этой модели для определения характера ЭВТ по области расплава в ванне ДППТ при наличии двух подовых электродов. Для достижения указанной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Разработка математических моделей распределения электромагнитного поля и ОЭМС по области расплава в ванне ДППТ при одном или двух подовых электродах.
2. Разработка пакета программ, реализующего возможность проведения серии расчетов для определения электромагнитного поля и ОЭМС по области расплава в ванне ДППТ.
3. Определение особенностей и пространственных закономерностей распределения электромагнитного поля и ОЭМС по области ванны в зависимости от диаметра и расположения подовых электродов при одинаковых токах, протекающих через них.
4. Создание экспериментальных установок и проведение исследований с их использованием.
5. Проведение численного эксперимента и проверка модели на адекватность с помощью экспериментальных данных.
6. Выявление характера ЭВТ расплава в ванне в зависимости от количества, диаметра и расположения подовых электродов.
7. Разработка практических рекомендаций по повышению эффективности перемешивания расплава в ванне с использованием ЭВТ.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались математическое моделирование, методы численного решения краевых задач и статистической обработки данных.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов обеспечена применением известных и широко апробированных математических методов, а также сравнением результатов численного моделирования с данными, полученными на экспериментальных установках.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые разработана математическая модель пространственного распределения электромагнитного поля и ОЭМС по области расплава в ванне ДППТ при одном и двух подовых электродах.
2. Установлены закономерности распределения электромагнитных полей и ОЭМС по области расплава в ванне ДППТ при одном и двух подовых электродах.
3. Установлен характер ЭВТ расплава в ванне ДППТ в зависимости от диаметра и расположения подовых электродов.

**Теоретическая ценность работы** состоит в том, что разработанную математическую модель можно применять не только для расчета в одно- и двуханодных дуговых печах, но и в многоанодных, посредством введения граничных условий для каждого нового анода, также можно задавать произвольную форму анода, например, кольцевую. Результаты данной работы расширяют теорию ЭВТ, возникающих при протекании тока через расплав.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что разработанный программный продукт «Ванна-ЭМП2» можно использовать при проектировании новых или реконструкции уже существующих ДППТ с целью повышения эффективности перемешивания расплава и снижения износа футеровки в районе подовых электродов. В работе приведены рекомендации по выбору

размеров и расположения подовых электродов в ДППТ для влияния на интенсивность ЭВТ в расплаве.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы, разработанные модели, методы и результаты вычислительных экспериментов докладывались автором на следующих международных и всероссийских научных конференциях: Региональная научно-техническая конференция «Новые программные средства для предприятий Урала» (Магнитогорск, 2008, 2007, 2005); XIII международная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Челябинск, 2007); Всероссийская научно-техническая конференция «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации» (Магнитогорск, 2005); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2004).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, приведенных в конце автореферата. Статьи [1 – 4] опубликованы в научных журналах, входящих в перечень ВАК. В статье [3] Манагарову В.Н. принадлежит математическая модель расчета напряженности магнитного поля (стр. 30 – 31). В статье [4] соискателю принадлежит математическая модель расчета напряженности электрического поля (стр. 23 – 24). В статье [10] Манагарову В.Н. принадлежит математическая модель расчета электромагнитного поля и ОЭМС, а также программная реализация данной модели (стр. 219 – 226). В работах [1, 2, 5 – 8] Ячикову И.М. принадлежит постановка задачи, Манагарову В.Н. принадлежат все полученные результаты.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложения. Объем диссертации составляет 128 страниц, объем библиографии – 93 наименования.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность изучения распределения ОЭМС по области ванны расплава ДППТ, проводится постановка цели и решаемых задач, определяется научная новизна и практическая ценность исследований.

**В первой главе, «Электромагнитные способы перемешивания металлических расплавов»,** проводится критический анализ существующих способов перемешивания расплава, рассматриваются их преимущества и недостатки. Установлено, что в настоящее время наиболее распространенным способом перемешивания является электромагнитный способ. Выделяют три его разновидности: индукционный, кондукционный и электровихревой способ. Индукционный и кондукционный способы широко применяются, однако их основным недостатком является необходимость использования дополнительного оборудования. Суть электровихревого способа заключается в том, что перемешивание расплава происходит за счет ОЭМС, которые возникают в результате взаимодействия протекающих токов с собственным магнитным полем. Этот способ находит применение на ДППТ. Электровихревое перемешивание расплава в ДППТ находится в стадии своего развития.

Сдерживающим фактором все большего распространения данного способа перемешивания, является слабая теоретическая проработка характера ЭВТ для случая асимметрично расположенных одного или двух подовых электродов. Становится неясным как влияет на ЭВТ расположение и диаметр подовых электродов. Изучение распределения ОЭМС по области расплава ДППТ дает возможность оценить схемы ЭВТ, понять причины возникновения вихрей над поверхностью подовых электродов, выявить «застойные» области расплава.

**Во второй главе, «Моделирование электромагнитных полей и ОЭМС»,** проводится постановка математической модели распределения электрических потенциалов, напряженности электрического и магнитного полей, а также ОЭМС по области расплава в ванне ДППТ.

При построении модели принималось, что расплав однороден по своему составу и имеет одинаковую удельную электрическую проводимость. Форму ванны ДППТ рассматриваем как усеченный конус, обращенный вниз меньшим основанием (рис. 1). Считаем, что диаметр поверхности ванны совпадает с диаметром «зеркала» металла. Принимаем, что подовый электрод имеет форму круга и вся его поверхность эквипотенциальна.

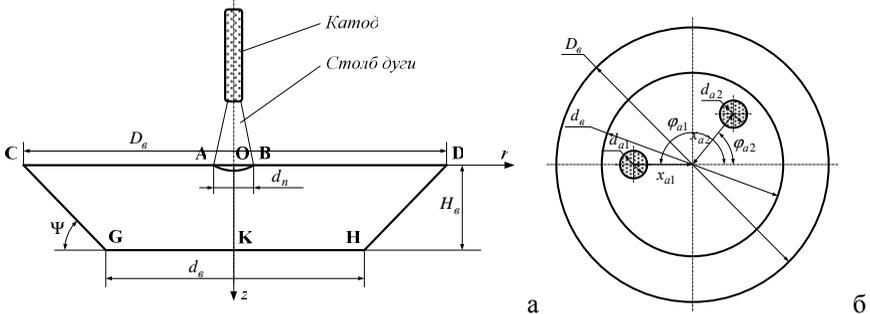


Рис. 1. Основные размеры ванны: вид подины сбоку (а) и сверху (б):

AB – область взаимодействия дуги с ванной расплава;  $d_n$  – диаметр пятна дуги;

CD – поверхность расплава;  $D_e$  – диаметр ванны;  $d_e$  – диаметр подины;

$\psi$  – угол откоса ванны; HG – подина;  $H_e$  – высота ванны; ОК – ось ванны;

$d_{a1}$ ,  $d_{a2}$  – диаметр первого и второго анода (подового электрода) соответственно;

$x_{a1}$ ,  $x_{a2}$  – расстояние от оси ванны до оси первого и второго анода соответственно;

$\varphi_{a1}$ ,  $\varphi_{a2}$  – угловая координата первого и второго анода соответственно

Выбираем цилиндрическую систему координат с началом, расположенным на поверхности ванны по ее центру, при этом ось z направлена вертикально вниз.

Для стационарного электрического поля уравнение Максвелла  $\text{div} \vec{E} = \sum q = 0$  сводится к уравнению Лапласа для электрического потенциала

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Дополним его граничными условиями.

На свободной поверхности ванны. Границу «металл-атмосфера печи» считаем непроводящей электрический ток, поэтому здесь должно выполняться граничное условие второго рода

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{BD} = 0 \text{ при } z=0, 0 \leq \varphi < 2\pi, r_n < r \leq R_\sigma, \quad (2)$$

где  $r_n = \frac{d_n}{2}$  – радиус пятна дуги,  $R_\sigma = \frac{D_\sigma}{2}$  – радиус поверхности ванны.

В области пятна дуги в расплав «втекает» ток  $I_d = I_{a1} + I_{a2}$ . Вся площадь пятна принимается эквипотенциальной

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{AB} = -\frac{J_n}{\sigma}, U|_{AB} = 0 \text{ при } z=0, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq r \leq r_n, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость расплава,  $J_n$  – плотность тока в анодном пятне, радиус пятна дуги  $r_n = \sqrt{I_d / (\pi J_n)}$ .

На боковой поверхности ванны (рис. 2). Выполняется условие равенства нулю градиента потенциала (стенка ток не проводит)

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{DH} \cos \psi + \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{DH} \sin \psi = 0 \text{ при } 0 \leq z \leq H_\sigma, 0 \leq \varphi < 2\pi, r = \frac{d_\sigma}{2} + z \cdot \operatorname{ctg} \psi. \quad (4)$$

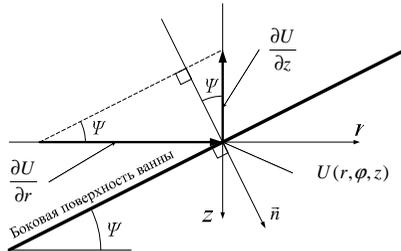


Рис. 2. Граничное условие на боковой поверхности ванны  
На оси ванны.

$$\left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{OK} = 0 \text{ при } 0 \leq z \leq H_\sigma, 0 \leq \varphi < 2\pi, r = 0. \quad (5)$$

В области первого и второго подовых электродов. Граничное условие определяется заданием значения нормальной составляющей плотности тока (условие Неймана). Для первого подового электрода

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{J_{a1}}{\sigma} \text{ при } z = H_\sigma, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq r \leq \frac{d_\sigma}{2}, \\ r^2 - 2rx_{a1} \cos(\varphi - \varphi_{a1}) + x_{a1}^2 \leq R_{a1}^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_{a1} = \frac{d_{a1}}{2}$ , – радиус первого подового электрода;  $J_{a1} = \frac{4I_{a1}}{\pi d_{a1}}$ , – плотность тока на поверхности первого подового электрода.

Для второго подового электрода условия задаются аналогичным образом.

В области дна ванны. Дно ванны не проводит электрический ток, поэтому

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{HG} = 0 \text{ при } z = H_e, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq r \leq \frac{d_e}{2}, \quad (7)$$

$$r^2 - 2rx_{a1} \cos(\varphi - \varphi_{a1}) + x_{a1}^2 > R_{a1}^2, r^2 - 2rx_{a2} \cos(\varphi - \varphi_{a2}) + x_{a2}^2 > R_{a2}^2.$$

**Напряженность электрического поля** и плотность тока определяется следующими выражениями:

$$\vec{E} = \frac{\partial U}{\partial \vec{n}}, \vec{J} = \sigma \vec{E}, E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}, E_\varphi = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi}. \quad (8)$$

**Напряженность магнитного поля** в произвольной точке ванны находится по уравнению Био-Савара-Лапласа

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} dV, \quad (9)$$

где  $\vec{R}$  – радиус-вектор, проведенный от элемента тока  $\vec{J}$  к точке A (рис. 3).

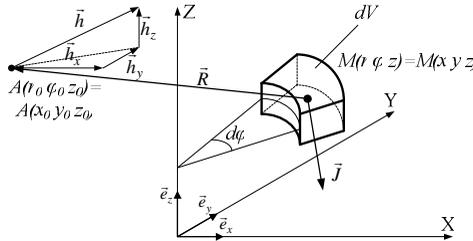


Рис. 3. К расчету напряженности магнитного поля

Используя принцип суперпозиции, напряженность магнитного поля в точке  $A(r_0, \varphi_0, z_0)$  равна векторной сумме элементарных полей, создаваемых всеми элементами  $dV$  токонесущего объема. Для нахождения составляющих напряженности магнитного поля необходимо проводить суммирование векторов по проекциям на оси координат (радиальной, осевой и азимутальной). Из-за того, что цилиндрическая система координат является подвижной, проекции векторов напряженности на ее оси не коллинеарны. Для получения главного вектора напряженности магнитного поля необходимо перейти к декартовой системе координат, в которой векторы компонент напряженности будут коллинеарны. Получаем выражения для расчета составляющих напряженности магнитного поля:

$$H_x = \frac{1}{4\pi} \int_0^{R_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{H_e} [(J_r \sin \varphi + \chi J_\varphi \cos \varphi)(z_0 - z) - J_z (r_0 \sin \varphi_0 - r \sin \varphi)] \cdot \eta \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz; \quad (10)$$

$$H_y = \frac{1}{4\pi} \int_0^{R_e} \int_0^{2\pi} \int_0^{H_e} [J_z (r_0 \cos \varphi_0 - r \cos \varphi) - (J_r \cos \varphi - \chi J_\varphi \sin \varphi)(z_0 - z)] \cdot \eta \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz;$$

$$H_z = \frac{1}{4\pi} \int_0^{R_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{H_0} [(J_r \cos \varphi - \chi J_\varphi \sin \varphi)(r_0 \sin \varphi_0 - r \sin \varphi) - (J_r \sin \varphi + \chi J_\varphi \cos \varphi)(r_0 \cos \varphi_0 - r \cos \varphi)] \cdot \eta \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz,$$

где

$$\eta = \frac{r}{\left[ (r \cos \varphi - r_0 \cos \varphi_0)^2 + (r \sin \varphi - r_0 \sin \varphi_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{3/2}},$$

$$\chi = \begin{cases} 1, & \text{для I и III координатной плоскости;} \\ -1, & \text{для II и IV координатной плоскости.} \end{cases}$$

Далее осуществляем переход к цилиндрическим координатам, получаем:

$$H_r = H_y \sin \varphi_0 - H_x \cos \varphi_0; \quad H_\varphi = H_y \cos \varphi_0 - H_x \sin \varphi_0. \quad (11)$$

Полученные значения напряженности магнитного поля и плотности тока в произвольной точке ванны  $A(r, \varphi, z)$  позволяют рассчитать **ОЭМС**

$$\vec{F}_A = \mu_0 \cdot \vec{J} \times \vec{H}, \quad (12)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная. Их проекции в декартовых координатах:

$$F_x = \mu_0 (H_z (J_r \sin \varphi + \chi J_\varphi \cos \varphi) - H_y J_z);$$

$$F_y = \mu_0 (J_z H_x - H_z (J_r \cos \varphi - \chi J_\varphi \sin \varphi)); \quad (13)$$

$$F_z = \mu_0 (H_y (J_r \cos \varphi - \chi J_\varphi \sin \varphi) - H_x (J_r \sin \varphi + \chi J_\varphi \cos \varphi)),$$

а в цилиндрических

$$F_r = F_y \sin \varphi - F_x \cos \varphi; \quad F_\varphi = F_y \cos \varphi - F_x \sin \varphi. \quad (14)$$

Решение краевой задачи (1) – (7) проводилось конечно-разностным методом. Для этого на расчетную область накладывалась трехмерная сетка. Используя симметричную аппроксимацию пространственных производных, проводилось преобразование уравнения (1). Полученная система алгебраических уравнений решалась методом Зейделя с последующей верхней релаксацией. Получаем следующую формулу расчета шага итерации:

$$U_{i,j,k}^{s+1} = (1 - \gamma) U_{i,j,k}^s + \frac{\gamma}{2(1+m+\frac{\lambda}{i^2})} \left[ \left(1 + \frac{1}{2i}\right) U_{i+1,j,k}^s + \left(1 - \frac{1}{2i}\right) U_{i-1,j,k}^{s+1} + m U_{i,j+1,k}^s + m U_{i,j-1,k}^{s+1} + \frac{\lambda}{i^2} U_{i,j,k+1}^s + \frac{\lambda}{i^2} U_{i,j,k-1}^{s+1} \right], \quad (15)$$

где  $m = \left(\frac{\Delta r}{\Delta z}\right)^2$ ,  $\lambda = \frac{1}{\Delta \varphi^2}$ ;  $\Delta r$ ,  $\Delta z$ ,  $\Delta \varphi$  – шаг сетки по осям  $r$ ,  $z$  и  $\varphi$  соответственно,  $\gamma$  – релаксационный параметр, использующийся для ускорения сходимости итерационного процесса,  $s$  – номер итерации.

Граничные условия также приводятся к конечно-разностному виду. Расчет по схеме (15) прекращается по условию

$$\max \left| U_{i,j,k}^{s+1} - U_{i,j,k}^s \right| / \left| U_{i,j,k}^{s+1} \right| < \xi_{\Delta U}, \quad (16)$$

где  $\xi_{\Delta U}$  – относительная точность расчета значений электрического потенциала.

Численная реализация показала, что разработанный алгоритм вычислительно устойчив, а получаемые решения хорошо сходятся.

Для расчета **проекции напряженности магнитного поля** на ось  $X$  в произвольной точке сетки  $(i_0, j_0, k_0)$  получаем следующее выражение:

$$H_{x_{i_0, j_0, k_0}} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\substack{k=0, \\ k \neq k_0}}^{N_\varphi-1} \sum_{\substack{j=0, \\ j \neq j_0}}^{N_z} \sum_{\substack{i=0, \\ i \neq i_0}}^{N_r} \left[ \left( J_{r_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi) + \chi J_{\varphi_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi) \right) \Delta z (j_0 - j) - \right. \\ \left. - J_{z_{i,j,k}} \Delta r (i_0 \sin(k_0 \cdot \Delta\varphi) - i \sin(k \cdot \Delta\varphi)) \right] \cdot \eta \cdot \Delta r \cdot \Delta z \cdot \Delta\varphi, \quad (17)$$

$$\text{где } \eta = \frac{i \cdot \Delta r}{\left[ \Delta r^2 \left( (i \cos(k \cdot \Delta\varphi) - i_0 \cos(k_0 \cdot \Delta\varphi))^2 + (i \sin(k \cdot \Delta\varphi) - i_0 \sin(k_0 \cdot \Delta\varphi))^2 \right) + \Delta z^2 (j - j_0)^2 \right]^{3/2}}.$$

Проекция на оси  $Y$  и  $Z$  находятся аналогичным образом. Переходим в цилиндрическую систему координат:

$$\begin{aligned} H_{r_{i_0, j_0, k_0}} &= H_{y_{i_0, j_0, k_0}} \sin(k_0 \cdot \Delta\varphi) - H_{x_{i_0, j_0, k_0}} \cos(k_0 \cdot \Delta\varphi); \\ H_{\varphi_{i_0, j_0, k_0}} &= H_{y_{i_0, j_0, k_0}} \cos(k_0 \cdot \Delta\varphi) - H_{x_{i_0, j_0, k_0}} \sin(k_0 \cdot \Delta\varphi); \end{aligned} \quad (18)$$

Проекция **ОЭМС** после преобразования уравнений (13) приобретает вид:

$$\begin{aligned} F_{x_{i,j,k}} &= \mu_0 \left( H_{z_{i,j,k}} \left( J_{r_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi) + \chi J_{\varphi_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi) \right) - H_{y_{i,j,k}} J_{z_{i,j,k}} \right); \\ F_{y_{i,j,k}} &= \mu_0 \left( J_{z_{i,j,k}} H_{x_{i,j,k}} - H_{z_{i,j,k}} \left( J_{r_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi) - \chi J_{\varphi_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi) \right) \right); \\ F_{z_{i,j,k}} &= \mu_0 \left( H_{y_{i,j,k}} \left( J_{r_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi) - \chi J_{\varphi_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi) \right) - \right. \\ &\quad \left. - H_{x_{i,j,k}} \left( J_{r_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi) + \chi J_{\varphi_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi) \right) \right). \end{aligned} \quad (19)$$

В цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} F_{r_{i,j,k}} &= F_{y_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi) - F_{x_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi); \\ F_{\varphi_{i,j,k}} &= F_{y_{i,j,k}} \cos(k \cdot \Delta\varphi) - F_{x_{i,j,k}} \sin(k \cdot \Delta\varphi); \end{aligned} \quad (20)$$

Данная математическая модель легла в основу компьютерной программы «*Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи*», которая позволяет проводить расчеты электромагнитного поля и ОЭМС по области расплава в ванне ДППТ и предоставляет возможность просмотреть результаты расчетов, как в табличном, так и различных графических видах.

**В третьей главе, «Результаты численного моделирования электромагнитного поля»**, с использованием созданной компьютерной программы проведены численные исследования поля электрических потенциалов, напряженности электрического и магнитного полей. Установлено, что:

- эквипотенциальные линии концентрируются вблизи зоны контакта с дугой, затем расходятся и вновь сосредотачиваются вблизи поверхности подовых электродов (рис. 4, а, б);

- модуль вектора напряженности электрического поля  $|\vec{E}|$  увеличивается при приближении к пятну дуги и подовым электродам;
- азимутальная проекция плотности тока  $|\vec{J}_\varphi|$  существенно меньше двух других компонент  $|\vec{J}_r|$  и  $|\vec{J}_z|$ ;
- большая часть тока протекает через усеченный конус, основания которого лежат в области пятна дуги и области подовых электродов;
- при удалении от линии, соединяющей центры пятна дуги и подовых электродов,  $|\vec{E}|$  резко падает и на периферии ванны ослабляется в несколько тысяч раз, при этом напряженность магнитного поля  $|\vec{H}|$  ослабляется всего на порядок (рис. 4, в, г).

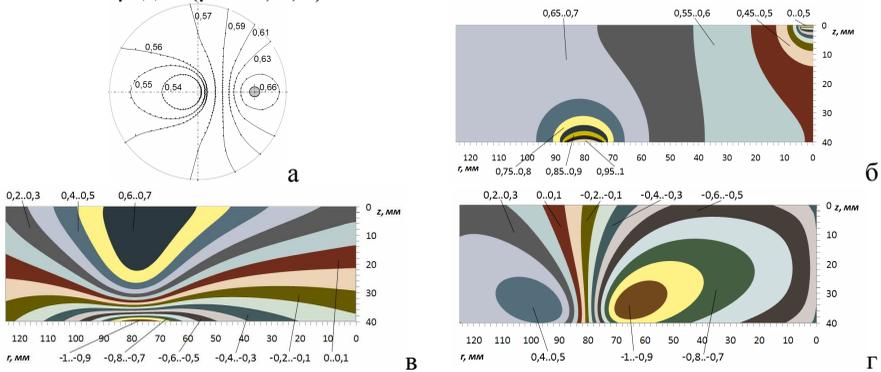


Рис. 4. Изолинии поля потенциалов на подине ванны (а); распределение поля потенциалов (б), а также осевой (в) и радиальной (г) составляющих напряженности магнитного поля в безразмерном виде в плоскости, проходящей через оси подового электрода и ванны при  $x_a = 80 \text{ мм}$

Если два подовых электрода имеют одинаковый размер и расположены на равном расстоянии от оси ванны и токи, протекающие через них, равны ( $I_{a1} = I_{a2}$ ), то для поля потенциалов, составляющих напряженности электрического поля и ОЭМС в расплаве всегда присутствует плоскость симметрии, которая проходит через ось ванны и перпендикулярна линии, соединяющей центры подовых электродов. С учетом ее азимутальной координаты  $\theta = (\varphi_{a2} + \varphi_{a1})/2$  установлены следующие закономерности распределения составляющих напряженности электрического поля и ОЭМС (при  $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ):

$$E_r(\theta - \alpha) = E_r(\theta + \alpha), \quad E_z(\theta - \alpha) = E_z(\theta + \alpha), \quad E_\varphi(\theta - \alpha) = -E_\varphi(\theta + \alpha), \\ F_r(\theta - \alpha) = F_r(\theta + \alpha), \quad F_z(\theta - \alpha) = F_z(\theta + \alpha), \quad F_\varphi(\theta - \alpha) = -F_\varphi(\theta + \alpha).$$

Рассмотрим основные закономерности распределения ОЭМС по области ванны ДППТ в зависимости от диаметра и положения подовых электродов. Установлено, что при одном и двух подовых электродах и их произвольном расположении:

- максимальные ОЭМС  $|\vec{F}|$  концентрируются в областях пятна дуги и подовых электродов, достигая своих экстремальных значений на их краях;
- с уменьшением диаметра подового электрода плотность тока на его поверхности увеличивается, что приводит к увеличению значений ОЭМС, действующих вблизи его поверхности;
- радиальная и азимутальная составляющие ОЭМС стягивают расплав к области пятна дуги и подовых электродов, при этом осевая составляющая уводит расплав от их поверхностей (рис. 5, а – в);
- в случае одного подового электрода ОЭМС пропорциональна квадрату тока, протекающему через расплав  $|\vec{F}| \sim I_d^2$ .

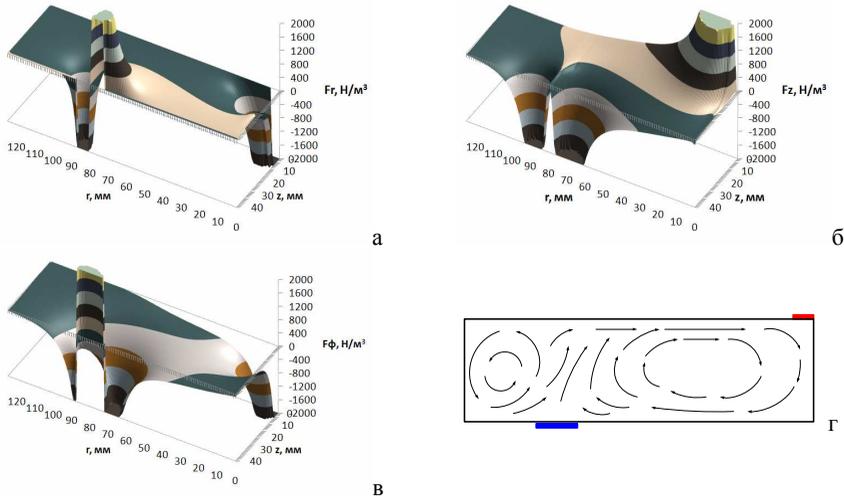


Рис 5. Составляющие ОЭМС в плоскости, проходящей через ось ванны и анода:  
 а – радиальная составляющая; б – осевая составляющая; в – азимутальная составляющая;  
 г – схема течения расплава, полученная на основе ОЭМС

**В четвертой главе, «Экспериментальные и численные исследования характера ЭВТ и ОЭМС в ванне расплава»,** с помощью исследования на экспериментальных установках осуществляется проверка адекватности разработанной математической модели, а также проводится выявление характера течения расплава в зависимости от количества, диаметра и расположения подовых электродов.

Первая экспериментальная установка представляла собой ванну, в подине которой располагались подовые электроды. В качестве модельной жидкости использовалась вода. Проводились серии экспериментов, по измерению значений потенциала в различных точках ванны при помощи зонда. При этих же условиях проводилось численное моделирование. Сопоставление результатов показало, что расчетные данные соответствуют экспериментальным, при этом средняя относительная ошибка аппроксимации не превышает 3%, а коэффициент корреляции не опускается ниже 0,91.

Для изучения характера ЭВТ в расплаве была создана лабораторная печь, моделирующая работу ДППТ. В качестве модельной жидкости использовалось олово. Исследования ЭВТ проводились на двух ваннах. Первая имеет цилиндрическую форму. Вторая имеет форму полуцилиндра, ось которого направлена горизонтально. С ее помощью можно исследовать характер течения расплава в плоскости, проходящей через ось ванны и электрода.

По результатам проведения экспериментов получены схемы течения расплава, которые сопоставлялись со схемами, полученными в результате анализа расчета ОЭМС по области ванны. Выявлены особенности и закономерности ЭВТ при различных расположениях подовых электродов.

Если на подине ванны расположен один подовый электрод и его ось совпадает с осью ванны ( $x_{al} = 0$ ), то в расплаве отсутствует азимутальная составляющая ОЭМС, в результате чего, течение расплава происходит лишь в меридиональной плоскости. Смещение электрода от оси ванны приводит к возникновению всех составляющие ОЭМС.

При асимметричном расположении подового электрода(-ов) в плоскости проходящей через ось ванны и ось анода, а также близкой к ней плоскостях, образуются два вихря. В первом вихре расплав выталкивается вверх от поверхности подового электрода осевой составляющей ОЭМС, стягивается к области пятна дуги радиальной составляющей силы, действующей на поверхности ванны, затягивается под дугу и затем радиальная составляющая ОЭМС притягивает расплав к области анода. Второй вихрь образуется в области между подовым электродом и стенкой ванны.

Преимущество асимметричного расположения подовых электродов по отношению к перемешиванию расплава заключается в том, что вращение идет уже во всех направлениях и потоки расплава из-под пятна дуги и подового электрода не противодействуют друг другу, а приводят расплав к эффективному раскручиванию. Перемешивание получается более интенсивным. Чем меньше диаметр подового электрода, тем больше величина ОЭМС в районе его расположения. Поэтому предлагается делать подовый электрод минимального диаметра, исходя из технологических возможностей, и располагать его на подине ванны со смещением от ее оси с целью уменьшения компенсации набегающего потока из-под пятна дуги.

Анализ азимутальной составляющей ОЭМС в области подового электрода показывает, что над его поверхностью образуются два противоположно вращающихся вихря (рис. 6). При достаточной их интенсивности они приводят к вымыванию футеровки. При асимметричном расположении подового электрода ОЭМС, возникающие в области его расположения, приводят к тому, что с одной из сторон подового электрода и непосредственно над ним осевая составляющая ОЭМС стремится увести расплав вверх, а с противоположной стороны затягивает расплав вглубь к подине.

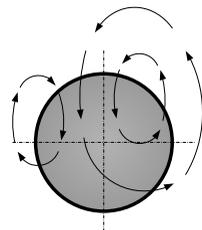


Рис. 6. Вихрь над поверхностью подового электрода

Анализ всех составляющих ОЭМС дает возможность получить картину течения металла на поверхности ванны для различных вариантов распо-

ложения подовых электродов (рис. 7). Выявленные схемы вращения подтверждаются лабораторными экспериментами.



Рис 7. Схемы течения расплава на поверхности ванны: а – асимметрично расположенный анод, б – аноды расположены под углом  $\Delta\varphi = 180^\circ$ , в – аноды расположены под углом  $\Delta\varphi = 90^\circ$

При расположении подовых электродов под углом  $\Delta\varphi = 90^\circ$  в расплаве наблюдается симметричное распределение ОЭМС (рис. 7, в) относительно плоскости  $\theta$ . Схема течения расплава в ванне ДППТ будет также симметрична относительно этой плоскости, что подтверждается лабораторными экспериментами. Область двугранного угла, образуемая плоскостями, проходящими через два подовых электрода, является наиболее оптимальной с точки зрения подачи легирующих, так как именно в этой области происходит интенсивное затягивание расплава вглубь ванны и благодаря этому уменьшается испарение легирующих, как это происходит при затягивании расплава под дугу.

## Основные результаты диссертационной работы

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Впервые разработана математическая модель пространственного распределения электромагнитного поля и объемных электромагнитных сил в ванне расплава дуговой печи постоянного тока при двух подовых электродах. Создан численный алгоритм нахождения напряженностей электрического и магнитного полей, а также поля объемных электромагнитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока при двух подовых электродах.
2. Разработан и зарегистрирован пакет программ, позволяющий численно моделировать объемные электромагнитные силы, действующие на расплав в ванне дуговой печи постоянного тока.
3. Проведена проверка адекватности полученной математической модели путем сравнения результатов численного моделирования и данных, полученных на экспериментальных установках.
4. Установлены закономерности распределения электромагнитных полей и объемных электромагнитных сил по области ванны расплава дуговой печи постоянного тока в зависимости от количества, диаметра и расположения подовых электродов. Определено падение напряжения на ванне и между подовыми электродами в зависимости от их диаметра и расположения.

5. Определен характер электровихревого течения расплава в зависимости от диаметра и расположения подовых электродов. Установлено, что:
  - с уменьшением диаметра подового электрода происходит увеличение объемных электромагнитных сил в его области и, как результат, электровихревое течение расплава становится более интенсивным;
  - при смещении подового электрода от центра ванны, а также при двух асимметрично расположенных подовых электродах в интенсивное движение вовлекается больший объем расплава и, как результат, размер «застойных» зон уменьшается;
  - при малом угле между подовыми электродами, в области расплава ограниченного плоскостями, проходящими через ось ванны и подовых электродов, образуется двугранный угол, в котором расплав интенсивно затягивается вглубь ванны.
6. Полученные результаты позволяют усовершенствовать процесс рафинирования и усреднения температуры и химсостава металла при его выплавке в дуговой печи постоянного тока, что значительно улучшит его качество.

### **Публикации по теме диссертации**

*Статьи, опубликованные в научных журналах из списка ВАК*

1. Манагаров, В.Н. Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ / И.М. Ячиков, В.Н. Манагаров // Вестник ИжГТУ. – 2008. № 4. – С. 192–195.
2. Манагаров, В.Н. Моделирование электромагнитных процессов в ванне расплава дуговой печи постоянного тока / И.М. Ячиков, В.Н. Манагаров // Программные продукты и системы. – 2008. № 3. – С. 81–83.
3. Манагаров, В.Н. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ. Сообщение 3. Особенности распределения напряженности электрического и магнитного полей при наличии одного или двух подовых электродов / И.М. Ячиков, Ю.Н. Смолин, В.Н. Манагаров, И.В. Портнова // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2008. № 3. – С. 29–33.
4. Манагаров, В.Н. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ. Сообщение 2. Электрические характеристики ванны ДППТ с двумя подовыми электродами / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, В.Н. Манагаров // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2006. № 11. – С. 23–26.

### *Другие публикации*

5. Манагаров, В.Н. Адекватность модели поля потенциалов в ванне ДППТ / И.М. Ячиков, В.Н. Манагаров // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIII международной конференции / Под ред. В.Е. Рощина. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. Ч.2. – С. 172–177.
6. Манагаров, В.Н. Моделирование электромагнитных параметров в ванне дуговой печи постоянного тока с несимметрично расположенными подовыми электродами / В.Н. Манагаров, И.М. Ячиков // Конкурс грантов

- студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ студентов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – С. 224.
7. Манагаров, В.Н. Моделирование процессов перемешивания расплава в ванне дуговой печи постоянного тока / В.Н. Манагаров, И.М. Ячиков // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 143.
  8. Манагаров, В.Н. Исследование электромагнитных параметров на «горячей» модели ДППТ / В.Н. Манагаров, И.М. Ячиков // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Челябинской области: Сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 113.
  9. Манагаров, В.Н. Моделирование электромагнитных процессов в ванне ДППТ при использовании неосесимметричных подовых электродов / В.Н. Манагаров // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. Часть 1. – С. 110–111.
  10. Манагаров, В.Н. Моделирование электромагнитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока с двумя подовыми электродами / И.М. Ячиков, В.Н. Манагаров, И.В. Портнова // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: Сборник научных трудов / Под ред. М.В. Бушмановой. Вып. 4. Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 219–227.
  11. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки. Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи: пакет программ. / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, В.Н. Манагаров. – № ГР 50200501270; дата регистрации 31.08.2005.

Подписано в печать 27.02.2009. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. № 1.  
Плоская печать. Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 160.

455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38  
Полиграфический участок ГОУ ВПО «МГТУ»