

На правах рукописи



**Портнова Ирина Васильевна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА В ВАННЕ  
ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДУГОВОЙ ПЕЧИ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ ВМЕСТИМОСТИ**

05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск 2017

**Работа выполнена** на кафедре технологии металлургии и литейных процессов в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»

**Научный руководитель** доктор технических наук,  
профессор Ячиков Игорь Михайлович

**Официальные оппоненты:**

**Афонаскин Александр Васильевич**, доктор технических наук, профессор  
технический советник исполнительного директора ОАО «Уральский научно-исследовательский технологический институт», г. Екатеринбург

**Тепляков Игорь Олегович**, кандидат технических наук, научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва

**Ведущая организация**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

**Защита диссертации состоится** «15» февраля 2017 года в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.01 ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001 ГУК.

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке**

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ) и на сайте университета  
<http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229801/portnova-irina-vasilevna>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет. Тел. (351) 267-91-23, факс (351) 267-92-28  
e-mail: iragzt@mail.ru

**Автореферат разослан** « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



Шабурова Наталия  
Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Дуговые печи постоянного тока (ДППТ) емкостью до 25 т находят широкое применение в «малой» металлургии машиностроительного и литейного производства при выплавке стали, чугуна, цветных металлов и сплавов, переработке шлаков, при этом печи, как правило, работают с полным циклом. В отличие от дуговых печей трехфазного переменного тока они обладают важным преимуществом, связанным с наличием токонесущего расплава, что дает более широкие возможности применения электромагнитного перемешивания, прежде всего посредством электровихревых течений (ЭВТ).

Технология электровихревого перемешивания расплава металла в ДППТ успешно применяется как в России (ОАО «Ковровский электрохимический завод», г. Ковров; ОАО «ПО Усольмаш» и др.), так и за рубежом (АО «Транснациональная Компания «Казхром», Казахстан, компания TokyoSteel, Япония, и др.). При ее использовании в ДППТ устанавливают один осевой графитированный электрод и не менее двух подовых электродов (ПЭ). На эффективность технологического процесса, ресурс работы ПЭ и футеровки печи влияют количество электродов, их расположение на подине и характер протекающих через них токов.

Однако теоретические и практические аспекты процесса перемешивания расплава металла в ванне посредством ЭВТ, возникающих в результате установки нескольких ПЭ, остаются до сих пор слабоизученными. Отсутствуют практические инженерные рекомендации и методики по выбору параметров ПЭ и токов, протекающих через них при электровихревом перемешивании.

При кондукционном перемешивании внешние магнитные поля могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на технологические процессы, протекающие в ваннах с жидким металлом. Возникающие интенсивные течения могут вымывать футеровку вблизи подовых электродов, приводить к характерному движению дуги по поверхности жидкого расплава или ее сильному отклонению от вертикали.

В настоящее время кондукционное перемешивание металла в ванне ДППТ практически не используется из-за недостаточного исследования воздействия внешних магнитных полей на токонесущий расплав и отсутствия простых, надежных конструкций по созданию внешних магнитных полей с заданной или управляемой конфигурацией. Недостаточно изученными остаются вопросы, связанные с взаимодействием токонесущего расплава в ванне ДППТ с собственными и внешними магнитными полями и характером возникающих объемных электромагнитных сил (ОЭМС).

**Цель работы:** повышение эффективности электровихревого и кондукционного перемешивания расплава металла под действием объемных электромагнитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока малой вместимости за счет выбора рациональных конструктивных и технологических параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие

задачи:

- изучить влияние интенсивности движения расплава на динамику нагрева и плавления куска ферромарганца;
- посредством компьютерного моделирования изучить поведение напряженности магнитного поля и объемных электромагнитных сил в жидкой ванне при разной конструкции токоподводов к подовому электроду, выбрать рациональные конструкции внешних индукторов, используемых при кондукционном перемешивании;
- посредством компьютерного моделирования определить влияние конструктивных параметров для одного или двух подовых электродов, токов протекающих через них, на собственное магнитное поле и объемные электромагнитные силы в ванне расплава ДППТ. Найти параметры и технологические режимы, повышающие эффективность электровихревого перемешивания расплава и разработать практические рекомендации;
- на физической модели исследовать характер течения токнесущего расплава в жидкой ванне при воздействии на него объемных электромагнитных сил, возникающих под действием внешних и собственных магнитных полей;
- найти параметры конструкции ДППТ малой вместимости, повышающие эффективность электровихревого и кондукционного перемешивания жидкой ванны.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач проводилось на основе физического моделирования с использованием методов теории приближенного подобия и размерности, а также компьютерного моделирования с помощью оригинальных программных продуктов.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Теоретически обоснована возможность управления интенсивностью и направлением течения металла в ванне ДППТ за счет изменения соотношения токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды. Рекомендован выбор характеристик пульсирующих токов, протекающих через подовые электроды для повышения эффективности перемешивания расплава в ванне ДППТ.

2. Установлены зависимости о динамике нагрева и плавления кусков ферромарганца различного размера от скорости их обтекания жидкой сталью.

3. Созданы математическая модель и программный продукт, позволяющие посредством компьютерного моделирования находить распределение напряженности внешнего магнитного поля вблизи токоподводов разной формы к подовому электроду при кондукционном перемешивании металла в ванне ДППТ. Получено распределение объемных электромагнитных сил и определен характер электровихревого течения в ванне ДППТ при подключении одного или двух подовых электродов и при смещении графитированного электрода от оси ванны.

4. Получены новые закономерности о влиянии диаметров подовых электродов и их расположения в ДППТ на интенсивность электровихревых течений и объемных электромагнитных сил, новые экспериментальные дан-

ные о характере течения токонесущего расплава при внешнем вертикальном магнитном поле и характере течений в жидкой ванне с одним и двумя подовыми электродами под действием собственного магнитного поля.

#### **Практическая значимость:**

1. Разработаны технические рекомендации по проектированию новых и реконструкции существующих ДППТ, приводящие к повышению эффективности перемешивания в них жидкометаллических расплавов.

2. Установлено, что при кондукционном перемешивании наиболее перспективной является конструкция токоподвода в форме плоской спирали Архимеда, имеющей 2–4 витка, а при использовании токоподвода в форме винтовой линии – не более 5–6 витков (пат. на ПМ РФ 19556, 126810).

3. При электровихревом перемешивании в ДППТ с двумя подовыми электродами рекомендуются следующие конструкционные параметры: подовые электроды должны образовывать двугранный угол между их осями и осью симметрии ванны  $70\text{--}100^\circ$ ; расстояние от оси ванны до осей подовых электродов –  $0,3\text{--}0,4$  радиуса ванны; площадь контакта подового электрода с металлом должна быть минимально возможной и определяться его тепловой работой.

4. Для интенсификации процесса электровихревого перемешивания в ванне ДППТ с одним подовым электродом рекомендуется смещать его от оси ванны на расстояние до  $0,3\text{--}0,4$  радиуса ванны и (или) сдвигать графитированный электрод на расстояние до  $0,8$  радиуса ванны. Сводовой электрод может быть выполнен из неграфитированного материала и в период перемешивания ванны работать в режиме заглубления.

5. Предложены новая конструкция ДППТ (пат. на ПМ РФ 52990), способ ведения электроплавки в ДППТ (пат. РФ 2293268), конструкции токоподвода к ДППТ (пат. на ПМ РФ 119556, 126810). Получены 2 свидетельства о госрегистрации программ для ЭВМ (№ 2012661209, 2014661999).

**Достоверность и обоснованность.** Достоверность результатов исследований обеспечивается применением современных измерительных приборов. Результаты экспериментов неоднократно проверялись на повторяемость. Адекватность математической и компьютерной моделей проверялась сравнением результатов с известными экспериментальными и литературными данными других авторов. Полученные материалы не противоречат известным физическим закономерностям и базируются на современных фундаментальных положениях и законах.

**Апробация работы.** Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: VII и X Конгрессах сталеплавыльщиков (г. Магнитогорск, 2002, 2008 гг.); на Международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии» (г. Москва, 2002 г.); на ежегодных региональных научно-технических конференциях «Новые программные средства для предприятий Урала» (г. Магнитогорск, 2002, 2003, 2004 гг.); на ежегодных научно-технических конференциях ГОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск, 2005–2007 гг., 2016 г.), на Российских школах по проблемам науки и технологий (Миасс,

2004, 2005 гг.); на Международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Челябинск, 2004, 2007, 2015 гг.); на 3-й Международной научно-практической конференции «На передовых рубежах науки и инженерного творчества» (г. Екатеринбург, 2004 г.); на VII съезде литейщиков (г. Новосибирск, 2005 г.); на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества» (г. Новокузнецк, 2006 г.); на Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.), на Международной научной конференции «Информационные технологии и системы» (Челябинск, 2014 г.); на Российской конференции по магнитной гидродинамике (г. Пермь, 2012, 2015 гг.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 20 работ в отечественных и зарубежных изданиях, из них: 1 – монография; 7 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 – в изданиях, входящих в базу цитирования «Scopus», получены 2 свидетельства о государственной регистрации разработки на пакет программ, 4 патента РФ.

**Объем и структура диссертации.** Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и приложений. Она содержит 144 страниц машинописного текста, включающего 79 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 136 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены ее цель и задачи, установлена новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проанализированы роль и влияние процесса перемешивания при выплавке металлов и сплавов, проведен анализ известных способов перемешивания расплава металла в ванне, приведены известные конструкции ДПНТ и оборудование, влияющие на процессы тепло- и массообмена в жидкой ванне. В результате проведенного анализа установлено, что существующие способы воздействия на расплав металла (химико-технологические; механические; газодинамические) по разным причинам не всегда возможны и безопасны, требуют установки дополнительного оборудования. Так, газодинамические способы чаще всего связаны с использованием газовых потоков или плазменных струй путем верхней, боковой или донной продувки через фурмы и пористые вставки. Поэтому наиболее перспективными являются бесконтактные электромагнитные способы перемешивания.

Рассмотрены существующие способы электромагнитного перемешивания металла в дуговых печах: индукционный, кондукционный и электровихревой. В настоящее время по данным направлениям ведутся интенсивные работы в НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Тверском государственном техническом университете, Красноярском государственном техническом университете, Институте высоких температур РАН (г. Москва) и ряде других. Вопросами теории, конструирования и эксплуатации оборудования при электромагнитном воздействии на металлические расплавы в разное время зани-

мались: Л.Л. Тир, А.Б. Капуста, В.С. Малиновский, С.И. Нехамин, Б.В.Чекин, В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков, А.Н. Семко, О.В. Казак и др.

Из анализа литературных источников установлено, что для ДППТ более перспективными являются технологии электровихревого и кондукционного перемешивания металла. Однако их использование ограничено, так как недостаточно полно изучены вопросы, связанные с конструкцией индукторов, используемых для кондукционного перемешивания, конструктивных параметров подовых электродов и токовых режимов через них при электровихревом перемешивании. На основании этого сформулированы цель работы и задачи исследования.

**Во второй главе** рассмотрена технология выплавки стали 110Г13Л, проанализирована динамика нагрева и плавления ферромарганца различного размера в зависимости от скорости его обтекания жидким металлом. На основе разработанной математической модели и компьютерной программы установлено, что на время расплавления ферромарганца существенно влияет скорость расплава (рисунок 1), так при скорости 0,1 м/с время расплавления по сравнению с неподвижным металлом снижается в 6 раз, а при скорости 0,3 м/с – в 10 раз.

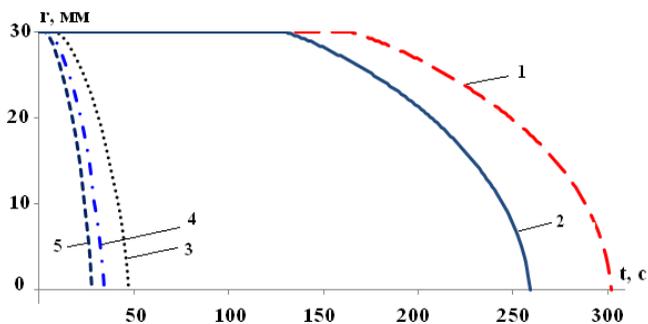


Рисунок 1 – Изменение радиуса ФМн от времени до его полного расплавления при разных скоростях  $W_{ст}$ , м/с: 1 – 0; 2 – 0,0001; 3 – 0,1; 4 – 0,2; 5 – 0,3

Важным моментом плавки является процесс усвоения ферросплавов при проведении легирования металла, занимающий продолжительное время. Для сокращения времени усвоения лигатур можно применить электромагнитное перемешивание, выравнивающее температурное поле и химический состав по объему ванны, а также влияющее на другие технологические процессы. Для этого необходимо знать поведение собственного и внешнего магнитных полей в жидкой ванне ДППТ.

Рассмотрена математическая модель для определения распределения магнитного поля в ванне ДППТ при использовании токоподводящей шины к ПЭ в форме одного витка, винтовой линии, плоской или пространственной спирали Архимеда, на основе которой разработана компьютерная программа «Расчет магнитного поля вблизи токоподводов различной конфигурации».

Посредством компьютерного моделирования изучено поведение напряженности магнитного поля в жидкой ванне при кондукционном переме-

шивании при разной конструкции токоподводов к ПЭ. Проведено исследование поведения магнитного поля в ванне сталеплавильной печи ДППТ-5 стандартной конфигурации с одним ПЭ при следующих параметрах: ток дуги  $I_d=6$  кА; радиус ванны по жидкому металлу  $R_g = 1,245$  м, ее высота  $H_g=0,34$  м.

Моделирование проводилось для плоской и пространственной спирали Архимеда, имеющих следующие параметры:  $a = R_u / (2\pi \cdot n) = 0,048$  м – радиальное смещение витков спирали;  $n=4$  – количество витков, которые сделает спираль для достижения внешнего радиуса  $R_u=1,2$  м;  $b=-0,3$  м – шаг винтовой линии;  $L_a \approx 15,3$  м – длина пространственной спирали. Для токоподвода, выполненного в виде одного витка, и цилиндрической винтовой линии моделирование проводилось для тех же значений  $R_u, b, n$ , при этом длина винтовой линии составляла  $L_g \approx 30,2$  м. Все токоподводы располагались на расстоянии  $z_0=0,3$  м от плоскости верхнего витка до подины ванны, контактирующей с жидким металлом.

Изучена зависимость радиальной ( $H_r$ ) проекции напряженности магнитного поля от координаты  $r$ , создаваемая токоподводами в виде плоской и пространственной спирали Архимеда. Установлено, что зависимости имеют схожий вид, но для плоской спирали Архимеда величина  $H_r$  существенно больше (рисунок 2).

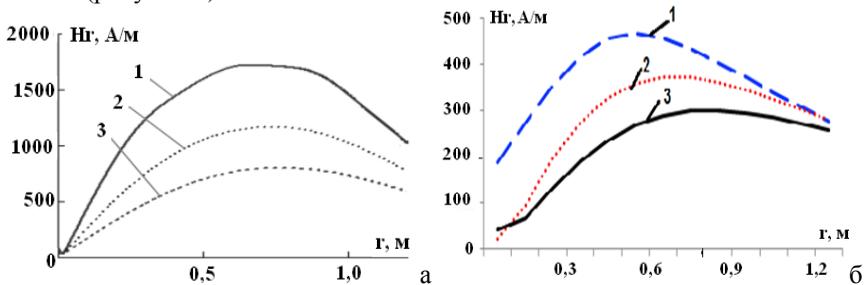


Рисунок 2 – Зависимости радиальной проекции напряженности магнитного поля от координаты  $r$ , создаваемые токоподводом в виде плоской (а) и пространственной (б) спирали Архимеда: 1 – на подине ванны ( $z_0=0,3$  м); 2 – на середине ванны по ее высоте ( $z=z_0+H_g/2$ ); 3 – на свободной поверхности ванны ( $z=z_0+H_g$ )

С увеличением расстояния от подины ванны до ее свободной поверхности значения  $H_r$  снижаются примерно в 4 раза.

Плоская спираль Архимеда является более перспективной, чем пространственная, так как при прочих равных условиях ее компактная форма обеспечивает высокие значения всех проекций напряженности магнитного поля в обрабатываемом расплаве металла, что интенсифицирует кондукционное перемешивание ванны.

Изучены зависимости вертикальной составляющей магнитного поля ( $H_z$ ) от числа витков  $n$  для токоподводов в виде винтовой линии и пространственной спирали Архимеда на середине ванны по ее высоте ( $z=z_0+H_g/2$ ). Выявлено, что с увеличением числа витков для токоподвода в форме цилиндри-

ческой винтовой линии осевая проекция напряженности магнитного поля  $H_z$  плавно возрастает и достигает насыщения при 5-6 витках (рисунок 3).

Для токоподвода в форме пространственной спирали Архимеда величина  $H_z$  в два раза меньше, чем для токоподвода в форме цилиндрической винтовой линии, и имеет максимальное значение при 2–4 витках.

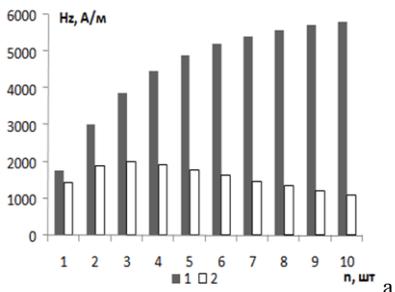


Рисунок 3 – Зависимость осевой напряженности магнитного поля в точке расплава металла с координатами  $r=0$ ,  $z=z_0+H_0/2$  от числа витков для токоподводов разной формы: 1 – цилиндрическая винтовая линия; 2 – пространственная спираль Архимеда

Для определения электромагнитных параметров и ОЭМС в ванне ДППТ с одним или двумя ПЭ при различных токах, протекающих через них, при электровихревом перемешивании. На ее основе создана компьютерная программа «Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи», с помощью которой проведено компьютерное моделирование по определению влияния конструктивных параметров ПЭ на собственное магнитное поле и ОЭМС в ванне расплава металла в ДППТ.

Установлено, что при электровихревом перемешивании расплава металла в ванне ДППТ наблюдаются все составляющие напряженности магнитного поля и ОЭМС (радиальная, азимутальная и осевая) при наличии одного ПЭ, смещенного от оси ванны, или при использовании двух подовых электродов. Напряженность магнитного поля и ОЭМС имеют максимальные значения на краях пятна дуги и ПЭ и минимальные – на осях ванны и ПЭ, а также у боковых стенок ванны ДППТ.

Выявлено, что при равенстве диаметров ПЭ и токов, протекающих через них, в характере магнитного поля и ОЭМС имеет место зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось ванны перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ.

Проанализирована зависимость проекций ОЭМС при изменении диаметра одного из ПЭ, когда диаметр другого электрода оставался постоянным ( $d_{a1} = 300$  мм,  $d_{a2} = \text{var}$ ). Установлено, что зависимости для радиальной и азимутальной проекций ОЭМС близки к линейным, причем при изменении

Из всех рассмотренных форм токоподводов магнитное поле имеет осевую симметрию только вблизи кругового витка (при  $b=0$ ,  $n=1$ ). Установлено, что с увеличением числа витков  $n$  распределение магнитного поля становится все более близким к осесимметричному. Поэтому при применении пространственных спиралей для получения поля, близкого к осесимметричному, следует использовать токоподвод с несколькими витками. Это позволяет избежать асимметрии течения расплава при кондукционном перемешивании.

Совместно с группой авторов была разработана математическая модель

одного из диаметров ПЭ в 3 раза по сравнению с другим происходит увеличение или уменьшение ОЭМС в ванне в пределах 10–14 % (рисунок 4).

Изучена зависимость осевой составляющей ОЭМС по радиусу ванны, проходящему через ось первого ПЭ, для областей близких к зеркалу ванны и к подине для разных диаметров ПЭ, оси которых размещены на одинаковом расстоянии от оси ванны ( $L_1 = L_2 = 400$  мм). Установлено, что на значения ОЭМС в области ПЭ постоянного диаметра практически не влияет изменение диаметра другого электрода (рисунок 5, кривые 1 и 3). Интенсивность ОЭМС, а значит ЭВТ, увеличивается с уменьшением диаметра ПЭ. Минимальный диаметр ПЭ задается его надежной тепловой работой и определяется на основе средней плотности тока  $0,3–0,5$  А/мм<sup>2</sup> и стойкостью футеровки при скорости расплава вблизи ПЭ, не превышающей 0,3 м/с.

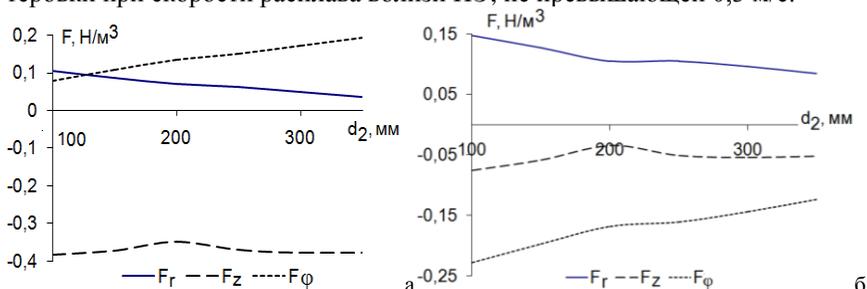


Рисунок 4 – Зависимость ОЭМС от диаметра ПЭ ( $d_{a1} = 300$  мм,  $d_{a2} = \text{var}$ )

при  $I_{a1} = I_{a2} = 1,6$  кА: а – в точке  $A(z, r, 0^0)$ ; б – в точке  $B(z, r, 90^0)$ ;  $F_r, F_z, F_\phi$  – радиальная, осевая и азимутальная составляющие ОЭМС

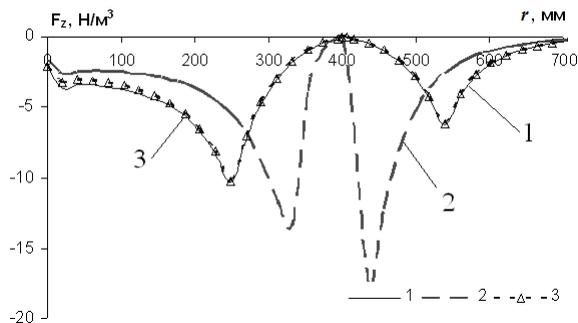


Рисунок 5 – Распределение осевой составляющей ОЭМС по радиусу ванны при токах через ПЭ  $I_{a1} = I_{a2} = 1,6$  кА: а – на поверхности ванны ( $z/H_0 = 0,03$ ); б – вблизи ПЭ ( $z/H_0 = 0,96$ ); 1 –  $d_{a1} = d_{a2} = 300$  мм; 2 –  $d_{a1} = d_{a2} = 100$  мм; 3 –  $d_{a1} = 300$  мм,  $d_{a2} = 100$  мм

Рассмотрено изменение характера ОЭМС при изменении расстояния  $L$  от оси ванны до осей ПЭ для варианта, когда  $L_2 = L_1$ . Установлено, что ОЭМС имеют максимальные значения при размещении ПЭ на расстоянии  $L = 0,3 – 0,4 R_0$ .

Проанализировано влияние значения угла между осью ванны и осями ПЭ  $\Delta\phi$  на поведение ОЭМС в ванне. При моделировании координаты первого подового электрода были фиксированными ( $\phi_1 = 0^0$ ,  $L_1 = 400$  мм), а у второго ПЭ изменялась азимутальная координата ( $\phi_2 = \text{var}$ ,  $L_2 = L_1 = \text{const}$ )

(рисунок 6). Установлено, что составляющие ОЭМС одного порядка и имеет место экстремальное значение при величине  $\Delta\varphi \approx 70\text{--}100^\circ$ .

Получено распределение азимутальной  $F_\varphi$  составляющей ОЭМС по радиусу ванны при различных углах  $\varphi$  ( $d_{a1} = d_{a2} = 300$  мм,  $L_1 = L_2 = 400$  мм,  $\Delta\varphi = 180^\circ$ ). Установлено, что  $F_\varphi$  при движении от оси к периферии ванны имеет экстремум на расстоянии от 0 до  $L_1 - d_{a1}/2$  (рисунок 7).

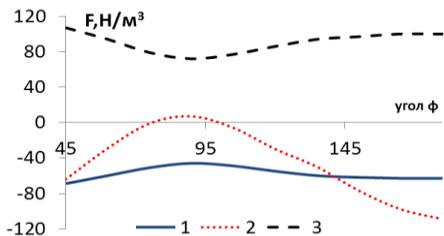


Рисунок 6 – Зависимость составляющих ОЭМС от угла  $\Delta\varphi$  на поверхности ванны при  $I_{a1} = I_{a2} = 3,0$  кА: 1 –  $F_r$ ; 2 –  $F_\varphi$ ;

3 –  $F_z$

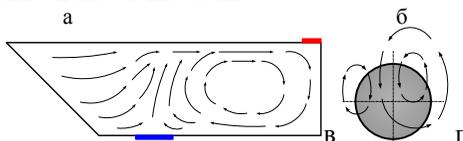
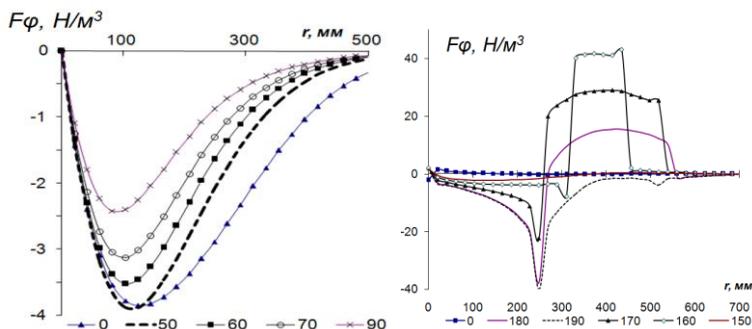


Рисунок 7 – Распределение  $F_\varphi$  по радиусу ванны при различных углах  $\varphi$  на ее середине  $z/H_\theta = 0,5$  для двух ПЭ: а – при токе  $I_{a1} = I_{a2} = 1,5$  кА; б – при токе  $I_{a1} = 0,1$  кА,  $I_{a2} = 2,9$  кА; в – характер течения металла в вертикальной плоскости; г – характер течения металла над поверхностью ПЭ в горизонтальной плоскости

Азимутальные проекции ОЭМС максимальны по модулю на расстоянии 80–150 мм от оси ванны (рисунок 7, а). Из анализа графиков получен характер движения металла в вертикальной плоскости, проходящей через оси ПЭ и ванны и в горизонтальной плоскости над поверхностью ПЭ (рисунок 7, в, г).

Из анализа расчетных данных получен характер движения металла в вертикальной плоскости, проходящей через оси ПЭ и ванны и в горизонтальной плоскости над поверхностью ПЭ.

**В третьей главе** на физической модели исследован характер течения

токонесущего расплава в жидкой ванне при воздействии на него ОЭМС, возникающих под действием внешних и собственных магнитных полей. При выборе размеров модельной ванны и параметров физического моделирования были учтены положения теории подобия. Принималось, что токонесущая жидкость однородна и изотермична, поэтому при моделировании характера течений использовались только два критерия подобия – число Рейнольдса  $Re = W_0 L_0 / \nu = idem$  и параметр электровихревого течения  $S_\nu = \mu_0 I_0^2 / (\gamma \nu^2) = idem$ , где  $W_0$  – характерная скорость жидкого металла, м/с;  $L_0$  – характерный размер;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Н/А<sup>2</sup>;  $I_0$  – характерная сила тока, А;  $\gamma$  – плотность расплава металла, кг/м<sup>3</sup>.

Соблюдение приближенного подобия электромагнитных и инерционных сил в жидком металле в районе токоподводов может быть обеспечено при выполнении условия  $\Pi = J_0 L_0^2 \sqrt{\mu_0 / \gamma} / \nu = idem$ , где  $J_0 = I / (D^2 \pi)$  – характерная плотность тока в области токоподводов;  $D$  – характерный диаметр токоподводов (пятно дуги или подовый электрод).

Определяющие критерии и соотношения масштабов для параметров модели и оригинала сведены в таблице 1 (данные, относящиеся к оригиналу, записываются со штрихом). Характер ЭВТ исследовался на экспериментальной установке, моделирующей течение металла в пятитонной ванне ДППТ стандартной конфигурации. На основании выбранного масштаба  $M_L$  получены основные размеры экспериментальной установки. В качестве модельной жидкости выбран расплав олова при температуре около 300<sup>0</sup>С.

Таблица 1 – Основные определяющие критерии и значения полученных масштабов и величин

Определяющий критерий	Определяемая величина	Значения полученных масштабов и величин
$M_L$	Геометрический масштаб и размеры модели	$M_L = L' / L = 10$ $L = L' / 10$
$Re = idem$	Скорость расплава металла	$M_W = \frac{W'}{W} = \frac{\nu'}{\nu} \frac{1}{M_L} \approx 0,24$ $W' = 0,24W$
$M_I$	Масштаб токов	$M_I = I' / I = 5$
$\Pi = idem$	Геометрический масштаб пятна дуги и подовых электродов	$M_D = \frac{D'}{D} = M_L \sqrt{M_I \frac{\nu}{\nu'} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}}} \approx 14$ $D' = 14 \cdot D$

Исследования характера ЭВТ проводились методом визуальных наблюдений и изучением материалов, полученных посредством видеосъем-

ки и ее последующей покадровой обработки. Экспериментальная лабораторная установка включала в себя источник электропитания постоянного тока для дугового нагрева, источник больших токов для создания ЭВТ, контрольно-измерительную аппаратуру и две плавильные емкости, моделирующие реальную ванну расплава металла.

Плавильные ванны № 1, 2 были изготовлены с учетом рекомендаций, полученных во второй главе. Был выбран двугранный угол между осями ПЭ и осью симметрии ванны,  $90^\circ$ , а расстояние между осями ПЭ и осью ванны составило 0,3 радиуса ванны. Плавильная ванна №1 выполнена в форме усеченного конуса, диаметр ванны по поверхности жидкого металла  $D_e=250$  мм, ее высота  $H=40$  мм, угол откоса  $\psi=33^\circ$ . В днище ванны на расстоянии 40 мм от центра ее оси были вмонтированы три цилиндрических медных ПЭ диаметром 16 мм. Если считать, что ось первого электрода проходит через азимутальную координату  $\varphi_1=0^\circ$ , тогда второго  $-\varphi_2=90^\circ$ , третьего  $-\varphi_3=180^\circ$ . Четвертый ПЭ такого же диаметра располагался по оси ванны.

Плавильная емкость ванны № 2, моделирующая течение металла в меридиональной плоскости, имеет форму полуцилиндра радиусом 125 мм со свободной поверхностью, проходящей через оси ванны и электродов. В боковые стенки ванны вмонтированы четыре медных электрода диаметром 8 мм, которые своими торцевыми поверхностями контактируют с зеркалом металла. С одной стороны размещены три электрода (анода), один из которых установлен по оси ванны, а два других – на расстоянии 80 мм от него. С другой стороны по оси ванны размещен один электрод (катод).

Для визуального наблюдения ЭВТ на электроды подавали ток  $I \approx 1000$  А от силового источника питания, причем при подаче напряжения на два анода токи через них были примерно одинаковыми ( $I_{a1} \approx I_{a2} = 500$  А). Схема подключения электродов показана на рисунке 8, а, б.

Для изучения кондукционного воздействия на металл на корпус плавильной ванны №1 с помощью токоподводящего кабеля наматывали несколько витков диаметром 36 см. Полученную катушку, для создания внешнего магнитного поля, последовательно включали между источником питания и ПЭ по схеме, показанной на рисунке 8, в.

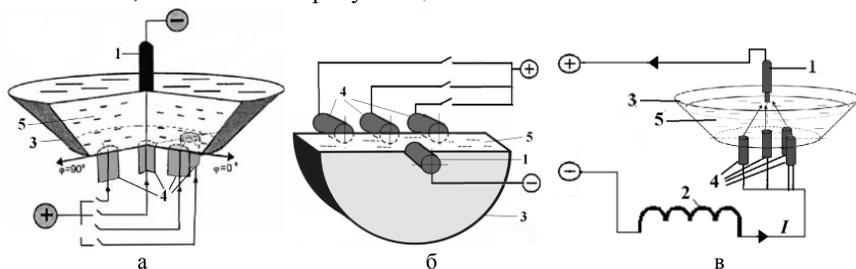


Рисунок 8 – Схема подключения электродов при электровихревом перемешивании (а, б) и при кондукционном перемешивании (в): а – к ванне № 1; б – к ванне №2; в – к ванне № 1; 1 – графитовый электрод; 2 – внешняя катушка; 3 – плавильная ванна; 4 – подовые электроды; 5 – расплав металла

В экспериментах исследовалось кондукционное перемешивание металла под действием тока порядка 100 А. Хотя этот ток меньше, чем используемый в экспериментах с ЭВТ, визуально было установлено, что возникающие течения в металлической ванне более существенны, чем ЭВТ. Это объясняется результатами, полученными в ходе компьютерного моделирования, которые показывают, что вертикальная составляющая внешнего магнитного поля существенно больше аналогичного собственного магнитного поля, возникающего за счет растекающегося тока по ванне.

Посредством физического моделирования исследован характер ЭВТ металла по ванне ДППТ с одним и двумя ПЭ (при двух ПЭ токи, проходящие через них, одинаковые). Получены схемы течения жидкого металла на свободной поверхности ванны и в меридиональной плоскости, проходящей через ось ванны.

Установлено, что при одном центральном ПЭ в ванне отсутствует азимутальное течение (рисунок 9, а). Процесс перемешивания в ванне интенсифицируется при смещении оси ПЭ от оси ванны (рисунок 9, б) или сдвиге графитированного электрода, работающего в режиме заглупления до 0,8 радиуса ванны за счет увеличения расстояния между осями электродов (рисунок 9, д).

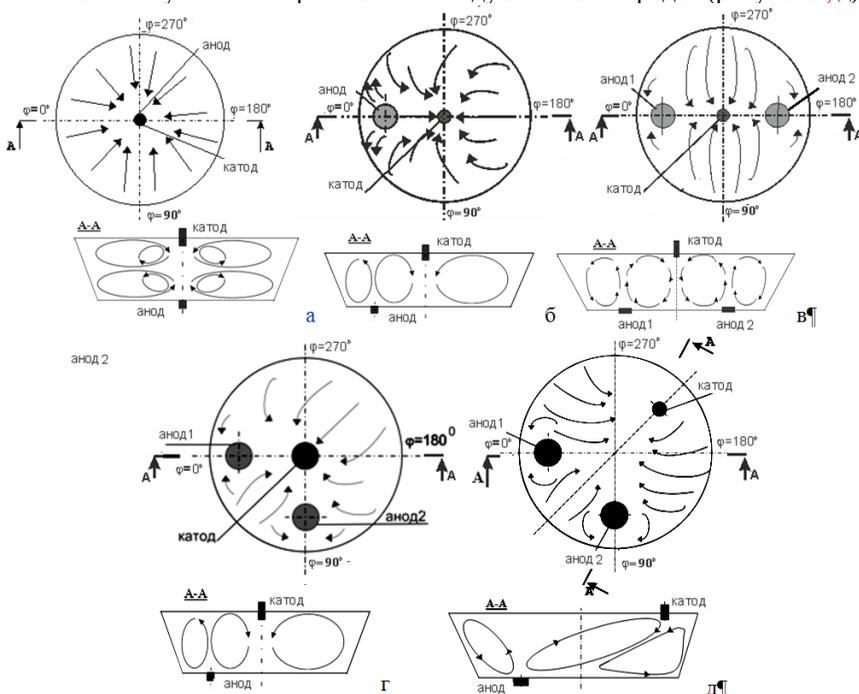


Рисунок 9 – Характер движения металла в ванне ДППТ с одним ПЭ (а, б) и двумя (в–д) подовыми электродами (вид сверху и сбоку): а – ПЭ расположен по оси ванны; б – ПЭ смещен от оси ванны; в – угол между осями ПЭ  $\Delta\varphi = 180^0$ ; г – угол между осями ПЭ

$\Delta\varphi = 90^0$ ; д – угол между осями ПЭ  $\Delta\varphi = 90^0$  (катод смещен от оси ванны)

Для усиления интенсивности перемешивания металла и возможности управления течением металла по ванне на подине печи необходимо размещать не менее двух ПЭ. Максимальные скорости движения металла наблюдаются на поверхности ванны вблизи катода и в областях, расположенных на краях ПЭ, минимальные – на боковых стенках ванны. Установлено, что для ПЭ, расположенных под углом  $\Delta\varphi = 180^\circ$  (рисунок 9, в), а также для ПЭ, размещенных под углом  $\Delta\varphi = 90^\circ$  (рисунок 9, г), при прохождении через аноды одинаковых токов на поверхности ванны отмечается симметрия потоков относительно плоскости, проходящей через ось ванны и перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ. Такая же картина наблюдается, если катод находится в плоскости симметрии (см. рисунок 9, д). Установлено, что с точки зрения перемешивания ванны при одном и том же токе дуги более эффективно использовать два ПЭ вместо одного.

Выявлено, что скорость и характер течения металла в меридиональной плоскости зависят от угла  $\varphi$ . При размещении одного ПЭ по оси ванны на свободной поверхности практически отсутствует азимутальное течение и наблюдаемое радиальное течение имеет минимальную среднюю скорость среди рассматриваемых вариантов. При подключении двух ПЭ значения средних скоростей на свободной поверхности ванны увеличиваются примерно на 35 %, и возрастают еще на 6 % в результате смещения катода относительно оси ванны.

Кроме экспериментов с расплавом олова для изучения движения жидкости во внешнем магнитном поле была создана экспериментальная установка, моделирующая ванну ДППТ, аналогичную показанной на рисунке 8, а. В качестве модельной жидкости использовался раствор поваренной соли в воде. Под ванной устанавливался электромагнит постоянного тока, представляющий собой катушку с сердечником.

Проведена серия экспериментов, в которых изучался характер движения жидкости при включении, выключении и изменении направления внешнего магнитного поля при различных комбинациях подключения ПЭ.

Было определено, что при воздействии на токонесущую жидкость вертикального магнитного поля возникает ее азимутальная закрутка. Направление вращения меняется при смене полярности тока или при изменении направления внешнего магнитного поля. Установлено, что при смещении подового электрода на расстояние  $4/5$  радиуса подины скорость течения жидкости на поверхности ванны возросла примерно в 2 раза, а застойные зоны вблизи боковых стенок ванны сокращаются на 70%. Даны рекомендации по размещению графитированного электрода в своде печи и подового электрода относительно загрузочного окна ДППТ.

**В четвертой главе** на основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований разработаны практические рекомендации по применению электровихревого и кондукционного перемешивания в ванне ДППТ.

Предложена конструкция ДППТ, позволяющая повысить производи-

тельность печи за счет установки второго сводового электрода, размещения на подине четырех ПЭ и дополнительных регуляторов тока для интенсификации перемешивания металла и его рафинирования. На каждом этапе электроплавки этот процесс осуществляется путем выборочного подключения подовых электродов и второго сводового электрода (пат. 52990РФ на ПМ).

Одна из главных причин вымывания футеровки связана с возникающими интенсивными электровихревыми течениями вблизи подовых электродов. Для ДППТ с двумя подовыми электродами рассмотрены способы управления перемешиванием металла и «сброса» вихрей. На существующих печах они реализуются с помощью цифрового микроконтроллера, позволяющего осуществлять управление силовыми токами. Один из наиболее распространенных вариантов такого управления – это уменьшение тока с периодом  $T$  через каждый токоподвод к ПЭ, со сдвигом фаз  $\psi = 180^0$  между ними, до минимального значения  $I_{\min}$ .

Предложена схема управления токами, протекающими через ПЭ, ее особенностью является увеличение тока через один подовый электрод при одновременном его уменьшении через другой (это в среднем эквивалентно изменению тока через каждый ПЭ удвоенной величины), что усиливает «подавление» вихрей в районе подовых электродов. Кроме этого, сумма токов, проходящих через ПЭ, в любой момент времени является величиной постоянной ( $I_{a1} + I_{a2} = \text{const}$ ), следовательно, в режиме перемешивания ванны остается неизменной и тепловая мощность дуги, а значит, не меняется производительность печи.

Установлено, что для токов, проходящих через ПЭ и меняющихся во времени по периодическому закону, существует зависимость среднеинтегральной силы от сдвига фаз между токами на разных расстояниях между двумя осями основных токов. Использование определенных функции для пульсирующих токов, проходящих через ПЭ, вызывает появление ОЭМС в объеме расплава металла, которые в зависимости от сдвига фаз между ними могут не только менять свое направление, но и величину в несколько раз. Это позволяет, меняя сдвиг фаз между токами, управлять интенсивностью электровихревого перемешивания жидкого металла в ванне.

Предложен способ ведения электроплавки в ДППТ с полым графитированным и двумя подовыми электродами, при котором управление перемешиванием расплава осуществляется путем наложения низкочастотных и высокочастотных пульсаций на общий ток дуги и сдвига фаз между токами, проходящими через подовые электроды (пат. 2293268 РФ).

Предложены конструкции токоподвода к ПЭ, где внешнее магнитное поле предлагается создавать шиной токоподвода, выполненной в виде кругового витка, плоской спирали Архимеда, цилиндрической винтовой линии или пространственной спирали Архимеда. Внутри токоподвода может находиться сердечник из ферромагнитного материала, перемещая который в вертикальном и горизонтальном направлениях можно управлять изменением величины

напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава металла ванны. Такая конструкция обеспечивает возможность управления движением металла в различные периоды плавки и позволяет снизить влияние электровихревых течений в области подового электрода (пат. 119556, 126810 РФ на ПМ).

Рассчитан ожидаемый экономический эффект работы ДППТ-5 производительностью 2,5 тыс. т жидкой стали в год. Предлагается ее модернизация путем использования кондукционного перемешивания металла за счет новой конструкции токоподвода к ПЭ в виде плоской спирали Архимеда.

Рассмотрены дополнительные расходы на приобретение и монтаж токопроводящей шины, приводящие к увеличению стоимости основных фондов. Считаем, что при интенсификации процесса перемешивания металла уменьшаются затраты по статье расхода легирующих элементов. Рассчитанный экономический эффект составил 2,67 млн руб. в год, срок окупаемости – 1 месяц.

### **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ**

1. Проанализирована динамика нагрева и плавления кусков ферромарганца различного размера в зависимости от скорости его обтекания жидким металлом. Установлено, что на время расплавления кусков ферромарганца существенно влияет скорость расплава, так, при скорости 0,1 м/с время расплавления по сравнению с неподвижным металлом снижается в 6 раз, а при скорости 0,3 м/с – в 10 раз.

2. Предложена математическая модель и программный продукт по нахождению распределения напряженности магнитного поля вблизи токоподводов разной формы к подовому электроду, которые предлагается использовать при кондукционном перемешивании токонесущего металла в ванне.

3. Установлено, что для кондукционного перемешивания наиболее перспективными являются конструкции токоподводов в форме плоской спирали Архимеда, имеющей 2–3 витка, и в форме винтовой линии, содержащей 5–6 витков.

4. Установлено, что при использовании кондукционного перемешивания при смещении подового электрода от оси ванны, скорость течения токонесущей жидкости на свободной поверхности ванны возрастает примерно в 2 раза, при этом застойная зона вблизи боковых стенок ванны уменьшается на 70 %. Даны рекомендации по размещению загрузочного окна в корпусе ДППТ при смещении графитированного или подового электрода от оси ванны.

5. Предложена методика выбора конструкционных параметров двух подовых электродов и их размещения на подине ванны ДППТ для более эффективного электровихревого перемешивания жидкого металла. Для повышения интенсивности объемных электромагнитных сил наиболее рациональны следующие параметры: оси подовых электродов и ось симметрии ванны должны образовывать двугранный угол  $70\text{--}100^{\circ}$ ; расстояние от оси ванны до оси подовых электродов - 0,3-0,4 радиуса подины ванны; площадь

контакта подового электрода с металлом должна быть минимально возможной и определяться его тепловой работой, средней плотностью тока 0,3-0,5 А/мм<sup>2</sup> и стойкостью футеровки.

6. С помощью физической модели установлен характер течения конусообразного расплава в жидкой ванне, возникающий под действием внешних и собственных магнитных полей. Показано, что скорость и характер течения металла зависят от количества подовых электродов и их расположения, а также от места размещения графитированного электрода. Установлено, что при одном и том же токе дуги, с точки зрения перемешивания ванны более эффективно вместо одного использовать два подовых электрода. Применение двух подовых электродов увеличивает значения средних скоростей на свободной поверхности ванны примерно на 35 %, и скорости возрастают еще на 6 % в результате смещения оси катода от оси ванны на 0,2 радиуса.

7. Показано, что при наличии в ДППТ только одного подового электрода существует принципиальная возможность интенсификации процесса электровихревого перемешивания за счет его смещения на расстояние до 0,3-0,4 радиуса ванны и (или) сдвига графитированного электрода на расстояние до 0,8 радиуса ванны от ее оси. Также возможно при работе в режиме перемешивания заглибление катода, выполненного из неграфитированного материала, в металл.

8. Обоснована теоретическая возможность управления интенсивностью и направлением течения металла в ванне ДППТ за счет изменения соотношения токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды. Предложена новая схема управления токами, протекающими через два подовых электрода. Рекомендован выбор периодических функций для пульсирующих токов, позволяющих управлять интенсивностью и направлением течения расплава в ванне.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах.

### **В монографии**

1. Моделирование электромагнитных процессов в электродуговых печах постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина, И.В. Портнова. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 140 с.

### **Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ**

2. Ячиков И.М., Портнова И.В. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ // Изв. вузов. Черная металлургия, 2005. № 7. С. 27—29.
3. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ. Сообщение 2. Электрические характеристики ванны дуговой печи постоянного тока с двумя подовыми электродами // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 11. С. 23—26.
4. Ячиков И.М., Портнова И.В. Электромагнитные процессы в ванне ДППТ при произвольном расположении подового электрода // Электрометаллургия. 2006. № 11. С. 35-39.

5. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ. Сообщение 3 / И.М. Ячиков, Ю.Н. Смолин, В.Н. Манагаров, И.В. Портнова // Изв. вузов. Черная металлургия, 2008. № 3. С. 29–33.
6. Ячиков И.М., Портнова И.В. Характер течения металла в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 3. С. 67–69.
7. Ячиков И.М., Портнова И.В., Харченко О.А. Характер электровихревого течения металла в ванне ДППТ при изменении положения катода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3. С. 18–20.
8. Ячиков И.М., Портнова И.В. Поведение магнитного поля в ванне ДППТ при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 76–81.

#### **Патенты**

9. Пат. 2293268 РФ, МКИ<sup>7</sup>F27В 3/08, С22В 9/22. Способ электроплавки в дуговой печи постоянного тока / И.М. Ячиков, А.П. Морозов, И.В. Портнова. Оpubл. 10.02.2007.
10. Пат. на ПМ 52990 РФ, МКИ<sup>7</sup> С22В 9/00, F27В 3/08. Дуговая печь постоянного тока / И.М. Ячиков, А.П. Морозов, И.В. Портнова. Оpubл. 27.04.2006.
11. Пат. на ПМ 119556 РФ, МКИ<sup>7</sup> H05В 7/20 Электродуговая печь постоянного тока / И.В. Портнова, И.М. Ячиков, О.А. Харченко. Оpubл. 20.08.2012.
12. Пат. на ПМ 126810 РФ, МКИ<sup>7</sup> H05В 7/20 Электродуговая печь постоянного тока / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, Р.Ю. Заляутдинов. Оpubл. 10.04.2013.

#### **Свидетельства о государственной регистрации**

13. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи: Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012661209. ОБПТБ. 2012. № 5. С. 589.
14. Портнова И.В., Ячиков И.М., Яковлев А.Д. Расчет магнитного поля вблизи токоподводов различной конфигурации: Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014661999. ОБПТБ. 2014. № 12. С. 580.

#### **Другие публикации в журналах, сборниках научных трудов**

15. Ячиков И.М., Колокольцев В.М., Портнова И.В. Электромагнитные силы в ванне дуговой печи постоянного тока // Черные металлургия: бюллетень НТИЭИ. 2007. № 8. С. 25–28.
16. Yachikov I.M., Portnova I.V. Electromagnetic processes in a DC arc-furnace bath with an arbitrarily located bottom electrode // Russian metallurgy (Metallurgy). 2007. № 7. pp. 571–575. DOI: 10/1134/S0036029507070063 (**Scopus**)
17. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Влияние положения подового анода на электромагнитное поле в ванне ДППТ // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ, 2005. Вып. 5. С. 222—227.

18. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Характер поведения объемных электромагнитных сил в ванне ДППТ при изменении токов через подовые электроды // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. Вып. 14. С. 215–219.
19. Ячиков И.М., Портнова И.В. Заляутдинов Р.Ю. Моделирование поведения магнитного поля в ванне ДППТ при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012, С. 183-190.
20. Ячиков И.М., Портнова И.В. Характер электровихревого течения металла в ванне дуговой печи постоянного тока // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 6. Ч. 3. С. 422–426.
21. Yachikov I.M., Portnova I.V. Modeling of magnetic field behavior in DC arc furnace bath for different designs of current lead of bottom electrode // Sciences of the Europe. VOL 2, No 2 (2) (2016). pp. 67–72.
22. Портнова И.В., Ячиков И.М. Моделирование процесса растворения ферромарганца при принудительном перемешивании жидкой ванны // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 1. С. 34–38.

Подписано в печать «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Формат 60x48 1/16

Печать – офсетная.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.