

На правах рукописи

МИХАДАРОВ Денис Георгиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДУГ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

Специальность 05.09.10 – Электротехнология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чебоксары 2016

Работа выполнена на кафедре автоматизированных электротехнологических установок и систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (г. Чебоксары).

Научный руководитель: **Миронов Юрий Михайлович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных электротехнологических установок и систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Официальные оппоненты: **Чердниченко Владимир Семенович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных электротехнологических установок федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Нехамин Сергей Маркович
доктор технических наук, генеральный директор общества с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма КОМТЕРМ»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ», г. Москва)**

Защита состоится 25 марта 2016 года в 15⁰⁰ час на заседании диссертационного совета Д 212.301.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в зале заседания Ученого совета (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус (корпус № 3), третий этаж, к. 301).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета: по адресу: 428015, г. Чебоксары, Московский пр., д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» (428034, г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38, библиотечный корпус, (8352) 45-02-07), library@chuvsu.ru и на сайте www.chuvsu.ru.

Автореферат разослан «01» февраля 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.301.02, к.т.н., доцент

Серебрянников
Александр Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время сталь выплавляется преимущественно в электропечах. Главным достоинством использования электронагрева для плавки стали в дуговых печах является возможность получения высоких температур и создания в рабочем пространстве печи как окислительной, так и восстановительной атмосферы.

Наибольшее распространение получили: печи переменного трехфазного тока ДСПТТ (обычно в литературе «ДСП») и печи постоянного тока (ДППТ).

Основной задачей является повышение энергоэффективности дуговых печей. Ее решение идет по нескольким направлениям, включающим использование новых конструктивных решений; совершенствование технологии плавки; применение комплексного нагрева. Актуальным является и оптимизация режимов работы печей.

Повышение эффективности работы печей невозможно без детального изучения электрических характеристик электрических дуг, горящих в дуговых печах.

Цель работы. Исследование особенностей характеристик электро-технологических дуг постоянного и переменного токов в дуговых печах литейного класса.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

1. Проведение аналитических исследований электродинамических явлений в дуговых печах и влияния их на дугу: рассматриваются явления «сжатия дуги», «электромагнитного дутья», воздействия столба дуги на поверхность жидкого металла с образованием «мениска»; рассчитываются отклонения и заглублиения дуг в жидкий металл.

2. Экспериментальное определение: статических вольтамперных и регулировочных характеристик дуги в печах постоянного и переменного токов; исследование регулировочных характеристик печи переменного тока.

3. Проведение оптимизации режимов работы дуговых печей с использованием полученных результатов исследований.

Положения, выносимые на защиту.

1. Анализ электродинамических усилий в дуговых печах, полученных с использованием соотношений, разработанных в результате исследований.

2. Результаты экспериментальных исследований характеристик электрических дуг в печах литейного класса в диапазоне токов от 0,5 кА до 2,5 кА постоянного тока и в диапазоне от 5 кА до 12 кА переменного тока: статических вольтамперных характеристик и регулировочных характеристик, градиента напряжения в столбе дуги.

3. Анализ данных, полученных в результате теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна.

Получены количественные характеристики отклонения столба дуги и заглупления дуги в жидкий металл под воздействием электродинамических усилий в дуговых печах литейного класса постоянного и переменного токов. Доказано, что отклонение зависит в первую очередь от длины дуги.

Получены экспериментальные данные, уточняющие сведения об электротехнологических дугах постоянного и переменного токов, горящих в дуговых печах литейного класса: статические вольтамперные характеристики (ВАХ) и регулировочные характеристики дуги, градиенты напряжения столба дуги.

Впервые изучены регулировочные характеристики дуговых печей переменного тока в диапазоне рабочих длин дуг.

Методы исследований и достоверность результатов. Экспериментальные исследования проводились современными методами с анализом метрологических погрешностей. В теоретических исследованиях и при обработке результатов экспериментальных изысканий широко применялись методы анализа электромагнитных полей, математические методы обработки данных в сочетании с современными компьютерными технологиями. Достоверность полученных результатов обеспечивается сопоставлением теоретических положений с экспериментальными данными.

Практическая ценность.

1. Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволили более обоснованно подойти к анализу и синтезу режимов работы дуговых печей, что было использовано при оптимизации режимов работы печей постоянного и переменного токов.

2. Результаты исследований могут быть использованы на стадии проектирования дуговых печей, для настройки систем автоматического режима работы, а также при оптимизации режимов работы существующих установок.

Использование результатов работы.

1. Результаты исследований используются при настройке регуляторов и оптимизации режимов работы дуговых сталеплавильных печей переменного тока емкостью 6 тонн, расположенных в ООО «Чебоксарский завод промышленного литья» Концерна Тракторные заводы.

2. Результаты используются при оптимизации работы дуговой печи постоянного тока ДПА-300 для переплавки алюминия емкостью 300 кг, расположенной в литейном цехе № 7 ОАО «АБС ЗЭИМ Автоматизация».

3. По результатам работы дополнены курсы дисциплин при подготовке бакалавров по профилю «Электротехнологические установки и системы» и магистров по магистерской программе «Электротермические процессы и установки с системами питания и управления» на кафедре автоматизированных электротехнологических установок и систем федерального государственного бюджетного учреждения высшего профес-

сионального образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международном XVII-ом Конгрессе IUE-2012 (International Union for Electricity Applications, Санкт-Петербург, 2012 г.);
- XII-ой Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», МКЭЭЭ-2008 (Алушта, 2008 г.);
- Международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке в современных условиях» (Казань, 2015).
- IV-ой Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов (Чебоксары, 2006);
- VII-ой Республиканской научно-технической конференции молодых специалистов «Электротехника, электромеханика, электроэнергетика» (Чебоксары, 2009)

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования отражены в 14 печатных работах, в том числе: 1 статья в международном журнале, представленном в базе цитирования Scopus, 4 статьи в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК России, 9 работ в других статьях и материалах конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 основных глав, заключения, приложения, выполнена на 123 страницах, содержит 64 рисунка, 15 таблиц, перечень литературы из 89 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы изучения характеристик электрической дуги, горящей в дуговых печах литейного класса, формулируются цели работы, ее основные положения, определяются содержание и методы выполнения работы.

В первой главе проведен анализ современного состояния металлургического производства. Отображается значимость дуговых электропечей в сталеплавильном и сталелитейном производствах. Дано современное представление о дуговых печах литейного класса, отмечены проблемы новых путей дальнейшего развития. Проведен анализ исследований по электропечным дугам и современному представлению о дугах, горящих в дуговых печах. Отмечен вклад других исследователей в изучении электротехнологических дуг.

Во второй главе проводятся аналитические исследования электродинамических явлений в дуговых печах постоянного тока и переменного трехфазного токов.

При протекании тока через столб дуги возникает собственное магнитное поле. Дуга, таким образом, подвергается воздействию собственного и внешнего электромагнитных полей. При этом возникают электродинамические эффекты: «дутье» и «сжатие». Осевое давление столба дуги воздействует на поверхность жидкого металла, образуя в нем углубление – «мениск».

В дуговых печах постоянного и переменного токов перечисленные эффекты имеют свою специфику в силу конструктивных особенностей печей и рода питающего тока.

Схематическая модель печи постоянного тока (рис. 1, а) состоит из основного электрода, горизонтального участка токоподвода (общей протяженностью b), двух вертикальных участков ($c, a = a_1 + a_2$) и электрической дуги длиной L_d .

Вектора напряженности и индукции магнитного поля в дуге, создаваемого током, протекающим в горизонтальном и вертикальных участках токоподвода, имеют одинаковое направление и поэтому воздействуют на столб дуги согласно, отклоняя его в сторону, обратную токоподводу, с суммарной силой $F_{\text{откл}} = F_{1\text{откл}} + F_{2\text{откл}}$ (рис. 1, б).

Отклоняющие силы, создаваемые горизонтальным участком токоподвода

$$F_{1\text{откл}}(x, z) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi(a+z)} \cdot \frac{b+x}{\sqrt{b^2 + (a+z)^2}};$$

и вертикальным участком токоподвода

$$F_{2\text{откл}}(x, z) = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi b} \cdot \left[\frac{c-(a+z)}{\sqrt{(b+x)^2 + [c-(a+z)]^2}} + \frac{a+z}{\sqrt{(b+x)^2 + (a+z)^2}} \right],$$

где I – ток, протекающий по участкам токоподвода; μ_0 – магнитная постоянная; a, b – геометрические параметры; x, z – координаты.

Действие отклоняющих сил вызывает отклонение дуг от вертикального положения. При взаимодействии тока дуги с собственным магнитным полем возникает сила F_d , действующая вдоль оси электрода.

В осевом направлении также действуют силы F_e и $F_{ад}$. Возникновению силы F_e способствует поток электронов, разогнанных в электрическом поле от катода к аноду. Сила $F_{ад}$ вызвана аэродинамическим потоком паров и газов, образующихся в дуге и зависящих от мощности дуги, составов шлака и металла.

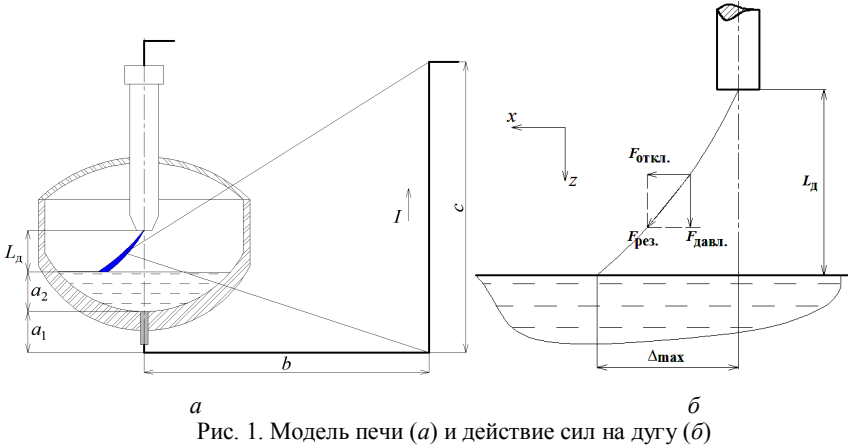


Рис. 1. Модель печи (а) и действие сил на дугу (б)

Баланс суммарных сил $F_{откл.}$ и $F_{давл.} = F_{д.} + F_{e.} + F_{ал.}$ определяет геометрию столба дуги и величину отклонения. Анализ расчетов показывает, что основное влияние на отклонение дуги оказывает вертикальный участок с конструкции токоподвода. При этом отклонение значительно снижается с увеличением расстояния b . При заданной конструкции токоподвода наиболее значительное влияние на отклонение дуги оказывает её длина (рис. 2).

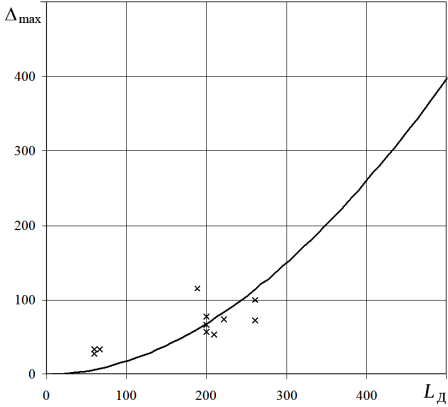


Рис. 2. Зависимость максимального отклонения $\Delta_{max} = f(L_{д})$

Полученные результаты подтверждены исследованием режимов дуговой печи для плавки алюминия емкостью 500 кг. Обработка фотоснимков позволила определить длину дуги $L_{д}$ и отклонение столба дуги в масштабе относительно диаметра торца электрода $d_{т.}$ (рис. 3).

Экспериментально установлено, что на постоянном токе при длине дуги более 100 мм вероятность выдувания дуги выражено значительно.

При этом электроды приобретают коническую форму (рис. 3, а), а при длине дуги менее 100 мм столб дуги горит практически центрировано с образованием в графитовом электроде кратера глубиной до 30 мм (рис. 3, б).

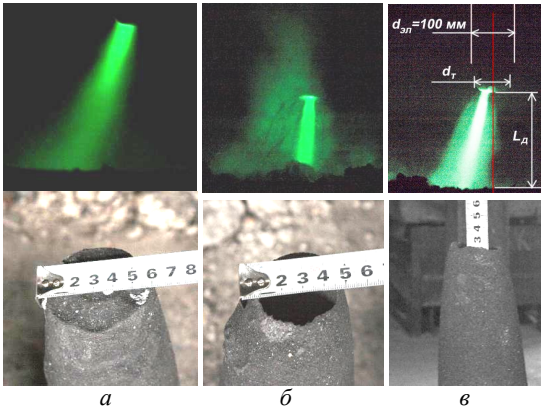


Рис. 3. Электрические дуги и соответствующие им электроды после проведения плавки (а, б); определение геометрических размеров (в)

С точки зрения улучшения условий работы футеровки и повышения срока ее службы целесообразно начальный период плавки проводить при большей длине дуги, а в период жидкого металла необходимо длину дуги уменьшать.

Суммарная сила $F_{\text{давл.}}$ действует и на поверхность жидкой металлической ванны, создавая давление

$$p_{\text{давл}} = p_{\text{д}} + p_{\text{е}} + p_{\text{ад}}$$

С другой стороны на металл действуют выталкивающая сила $F_{\text{выт}} = \rho gh$ и сила поверхностного натяжения $F_{\text{н}} = Gl$ (рис. 4), где ρ – плотность жидкого металла, G – коэффициент поверхностного натяжения, h – глубина мениска, l – линейный размер поверхности металла.

Баланс сил в любой рассматриваемой точке поверхности металла $F_{\text{д}} = F_{\text{выт}} + F_{\text{н}} \cos \alpha$ определяет профиль мениска (α – угол между направлением силы поверхностного натяжения и ее проекцией на плоскость, касательную к поверхности мениска в рассматриваемой точке).

Расчеты показывают, что глубина мениска зависит от тока печи примерно по линейному закону. Отклонение столба дуги ослабляет электродинамическое воздействие на металл, и глубина мениска уменьшается (рис. 5, 6).

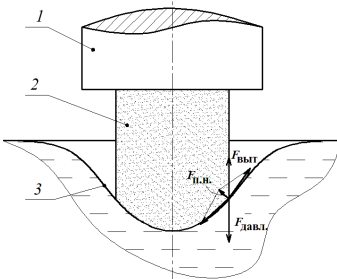


Рис. 4. Образование мениска: 1 – электрод, 2 – столб дуги, 3 – поверхность мениска

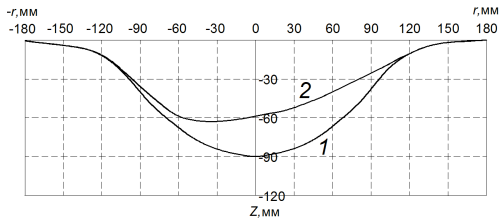


Рис. 5. Профиль мениска на постоянном токе без учета (1) и с учетом (2) отклонения дуги ($I_{\text{д}} = 40 \text{ кА}$)

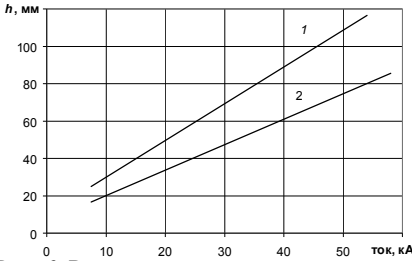


Рис. 6. Результат расчета влияния тока на глубину мениска без учета (1) и с учетом (2) отклонения столба дуги

В дуговой сталеплавильной печи переменного трехфазного тока проявляются специфические электродинамические эффекты, вызванные взаимодействием токов электродов с различными начальными фазами в условиях отсутствия нулевого провода. Ток какой-либо фазы, пройдя через дугу, замыкается с токами других фаз в жидкой металлической ванне.

Электродинамические силы взаимодействия тока этой фазы с токами других фаз переменны во времени (рис. 7).

При протекании переменного синусоидального тока сжимающая и отклоняющая силы будут изменяться с двойной частотой. Радиус столба дуги также флуктуирует с двойной частотой. Вследствие этого поверхность жидкой металлической ванны испытывает воздействие с той же частотой. При этом электронная составляющая сжимающей силы будет действовать только в полупериод прямой полярности.

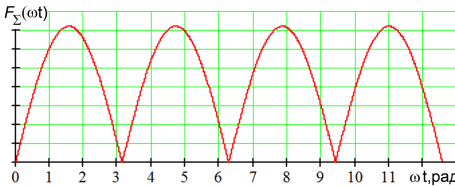


Рис. 7. Изменение результирующей силы, отклоняющей дугу, во времени

Изменение формы дуги в период жидкого металла отображено на рис. 8. Дуга загорается в вертикальном положении, однако по мере увеличения силы тока возрастает отклонение дуги от вертикального положения в сторону футеровки.

При этом происходит вращение опорного пятна дуги на металле по часовой стрелке с двойной частотой. После прохождения максимума тока отклонение дуги уменьшается к концу полупериода, после чего цикл повторяется.

Отклонение столба дуги в один из моментов времени изображено на фотоснимке (рис. 9).

На рис. 10 представлены результаты расчета отклонения дуги и мениска для тока дуги 16 кА, различных моментов времени ($\omega t = 30, 60, 90$ эл. град.) и длин дуг ($L_d = 100, 200$ мм).

Анализ результатов показывает, что величина отклонения, как и на постоянном токе, зависит от длины дуги.

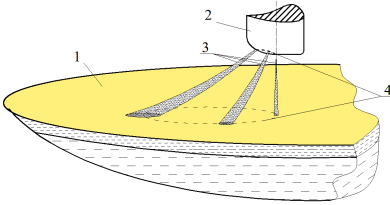


Рис. 8. Изменение формы дуги. 1 – жидкий металл; 2 – электрод; 3 – столб дуги в различные моменты времени; 6, 7 – траектории пятен



Рис. 9. Дуга переменного тока в дуговой печи ДСП-6

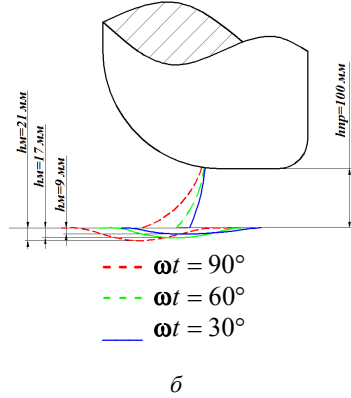
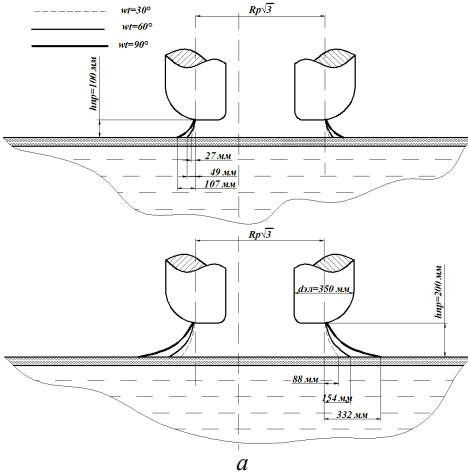


Рис. 10. Результат расчета отклонения дуги (а) и глубины мениска (б)

Для сравнения на рис. 11 показана зависимость глубины мениска от силы тока в печах постоянного и переменного трехфазного токов.

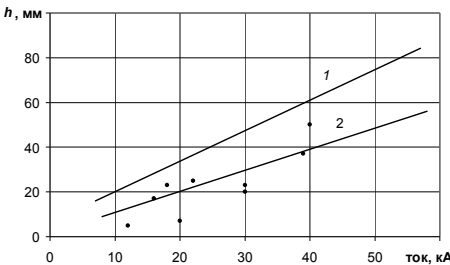


Рис. 11. Результаты расчета влияния тока на глубину мениска в печи постоянного тока с учетом отклонения дуги (1) и в печи переменного тока (2)

Сравнение показывает, что характер влияния тока на глубину мениска одинаков.

Однако на переменном токе величина глубины мениска меньше. Это связано с рядом факторов, из которых необходимо отметить ослабление влияния электростатического давления электронов и размытость пятна дуги переменного тока на поверхности жидкого металла из-за ее флуктуации и смены полярности тока в дуге.

В дуговой печи постоянного тока с расщепленным электродом (рис. 12) дуги, взаимодействуя между собой, отклоняются к центру печи.

Электромагнитное поле, создаваемое токами, протекающими в участках вторичного токоподвода, оказывает влияние на столб каждой из трёх дуг, отклоняя его в сторону противоположную токоподводу.

По каждому электроду протекает ток I_d , а по остальным участкам токоподвода протекает ток $I = 3I_d$, равный току одноэлектродной печи.

Степень отклонения зависит от длины дуги, тока и геометрических параметров (диаметра распada, протяженности участков токоподвода, глубины жидкой металлической ванны). Очевидно, что чем меньше диаметр распada D_p , тем сильнее взаимодействие.

Дуги также испытывают воздействие магнитных полей, создаваемых токами участков вторичного токоподвода и жидкой металлической ванны. Эти поля являются поперечными по отношению к дуге.

Результаты расчета отклонения (рис. 13) позволяют проанализировать расположение анодных пятен на поверхности жидкой ванны металла. При коротких дугах существуют 3 анодных пятна. Увеличение длины дуги перемещает анодные пятна к центру печи, постепенно образуя общее анодное пятно.

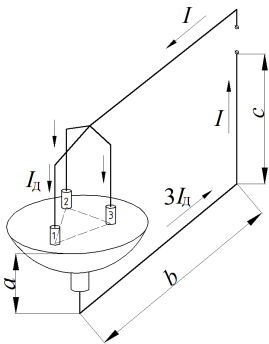


Рис. 12. Схема дуговой печи постоянного тока с расщепленным электродом

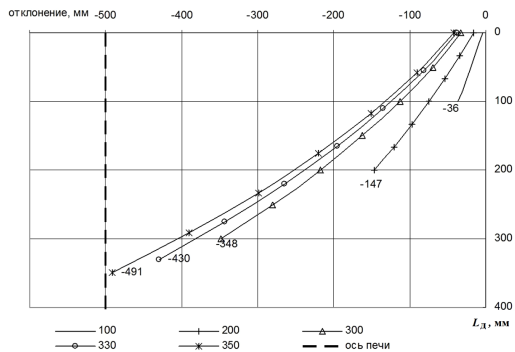


Рис. 13. Профили дуг в дуговой печи постоянного тока с расщепленным электродом

Применение расщепленного электрода позволяет получить симметричное тепловое поле футеровки и минимизировать явление горячих и холодных зон.

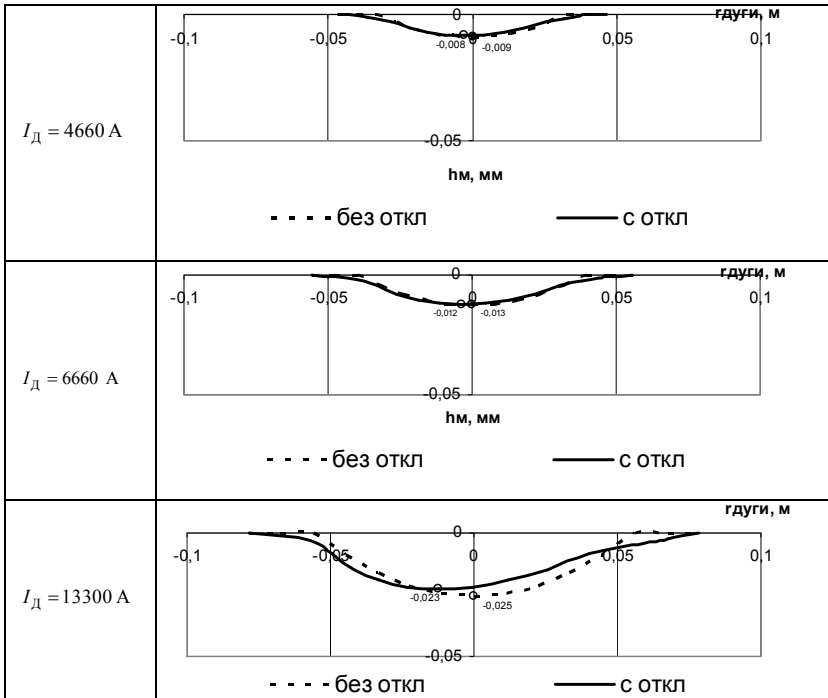
Слияние отдельных анодных пятен в общее анодное пятно происходит при длине дуги, равной примерно $(0,3 \div 4)p$, где p – сторона равносоставленного треугольника. Эти данные позволяют соотнести конструктивные параметры печи (диаметр распada электродов) и параметры ре-

жима, характеризующие длину дуги, оптимизируя конструкцию печи при заданной мощности.

Отклонение дуг к центру печи оказывает влияние и на образование мениска. В табл. 1 приведены результаты расчета мениска для печи с расщепленным электродом при различных токах дуги, горящих без отклонения и с отклонением от оси электрода.

Таблица 1

Профиль мениска при различных токах дуги



На рис. 14 показан процесс образования мениска при слиянии пятен. Наибольший диаметр горячего пятна будет при близком, но не перекрывающемся друг друга расположении анодных пятен (рис. 14, а), а наибольшая глубина мениска будет при полном слиянии (рис. 14, в).

Полное слияние нежелательно вследствие локального перегрева жидкой металлической ванны, что может вызвать перегрев подового электрода и прожиг подины печи.

Сравнение менисков (табл. 2) показывает, что расщепление электрода позволяет получить три мениска меньшей глубины, по сравнению с одноэлектродной печью, и при этом прогреваемая поверхность металла будет больше.

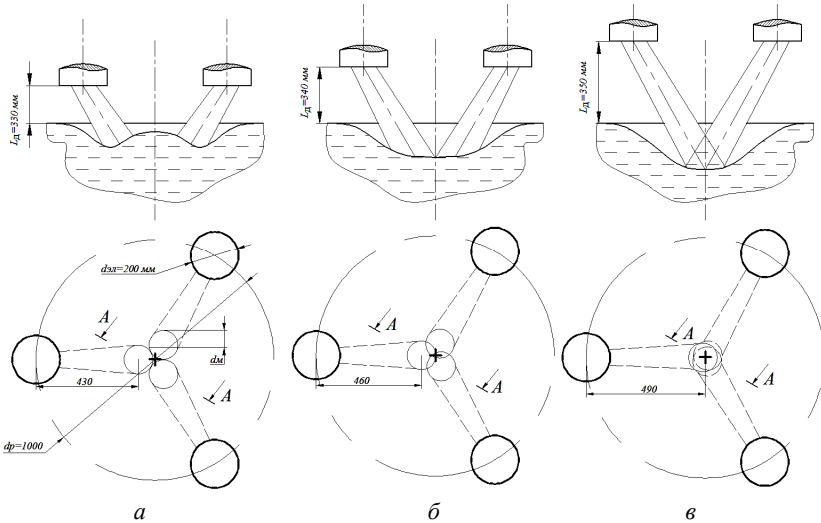
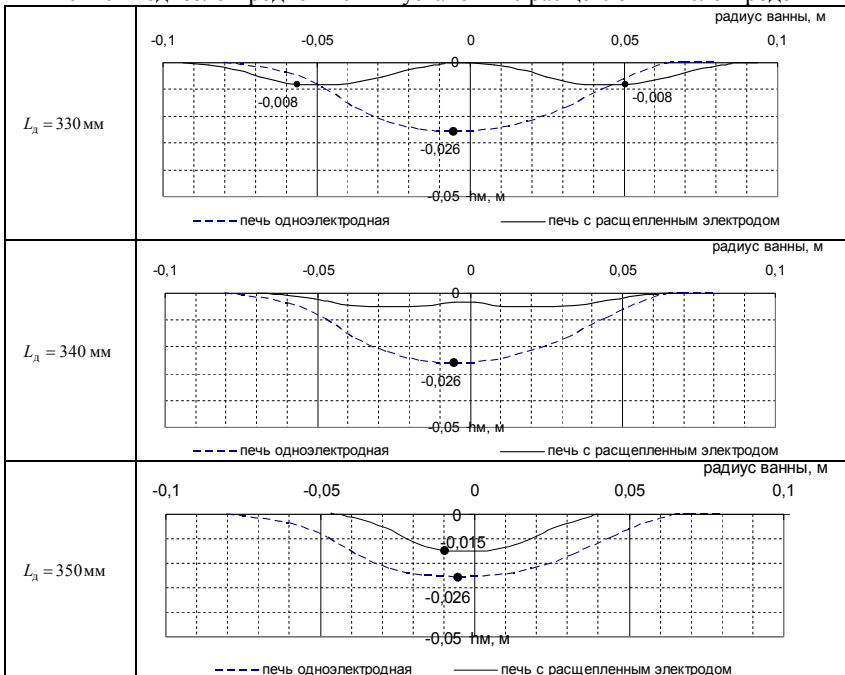


Рис. 14. Образование мениска при различном расположении анодных плит

Таблица 2

Мениски одноэлектродной печи и установки с расщепленным электродом



Проведенные исследования показывают, что применение расщепленного электрода дает возможность снизить влияние негативных последствий электромагнитных взаимодействий в одноэлектродных ДППТ, способствуя более равномерному распределению мощности в ванне и снижению эффекта горячих и холодных зон.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования статических вольтамперных характеристики $U_d = F_1(I_d)$ (ВАХ) и регулировочных характеристик $U_d = F_2(L_d)$ дуг постоянного и переменного токов. Работа проводилась на промышленных электропечах в период жидкого металла: дуговой печи постоянного тока емкостью 300 кг для переплава алюминия и дуговой сталеплавильной печи переменного тока емкостью 6 тонн.

На постоянном токе статические ВАХ имеют слабозрастающий характер (рис. 15, а). Рост тока дуги приводит к усилению электродинамических усилий сжатия столба дуги, что приводит к увеличению сопротивления столба дуги и напряжения дуги.

Наличие слоя шлака на поверхности расплава способствует снижению напряжения горения дуги, что дает возможность иметь более длинные дуги при одном и том же напряжении источника питания. Так, при чистом зеркале поверхности металла максимально возможная длина дуги достигает 200 мм, а при наличии шлака – 300 мм.

Анализ регулировочных характеристик дуги (рис. 15, б) показывает, что они достаточно точно описываются известным выражением $U_d = \alpha + \beta L_d$, где α – сумма приэлектродных падений напряжения, В; β – градиент напряжения (средняя по длине дуги напряженность электрического поля в дуге), В/мм.

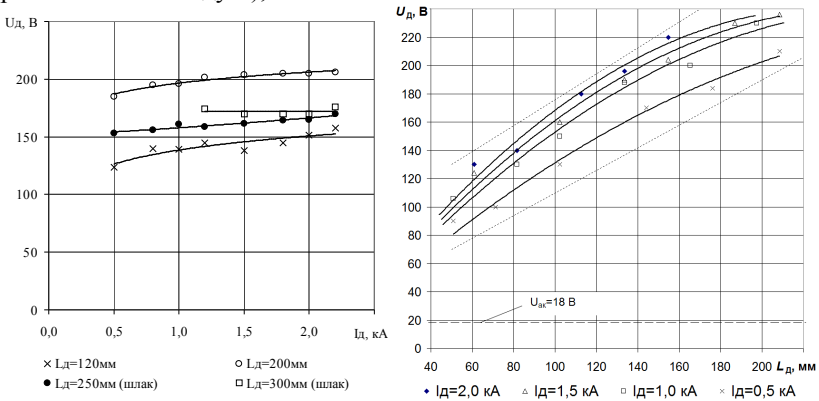


Рис. 15. Статические вольтамперные (а) и регулировочные (б) характеристики дуги постоянного тока

На рис. 16 представлены зависимости градиента напряжения от тока дуги и длины дуги, полученные дифференцированием экспериментальных регулировочных характеристик. Из этих зависимостей видно, что увеличение длины дуги приводит к уменьшению градиента напряжения столба дуги. При увеличении силы тока сильнее проявляется «эффект сжатия» дуги, поэтому чем больше сила тока, тем ярче выражена эта зависимость (рис. 16, а).

С другой стороны, влияние силы тока неоднозначно для различных длин дуг (рис. 16, б). Так, например, при длине дуги 50 и 100 мм с увеличением тока градиент напряжения растет, а при длине 150 и 200 мм – уменьшается. Это, по-видимому, связано со снижением роли конусности дуги при увеличении ее длины.

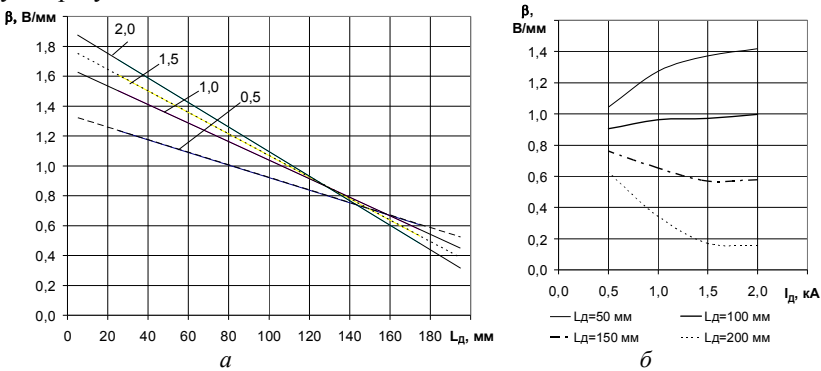


Рис. 16. Зависимости градиента напряжения столба дуги от длины дуги при значениях силы тока 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 кА (а) и от тока дуги (б)

Исследование дуги переменного тока показало, что влияние длины дуги на характер ВАХ (рис. 17) проявляется более явно. При переходе от «короткой» к «длинной» дуге ВАХ постепенно меняет характер, переходя от возрастающего – к падающему. Это, по-видимому, связано с ростом доли излучения в теплообмене дуги с окружающим пространством.

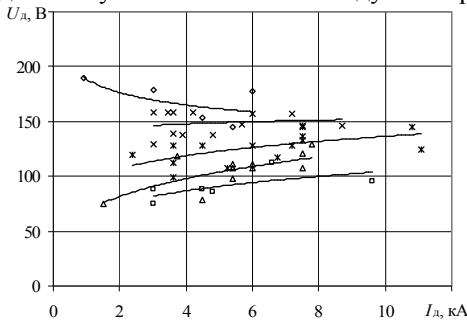


Рис. 17. Статические ВАХ дуги при длине дуги: □ – 4 мм; Δ – 7 мм; * – 13 мм; ◇ – 72,5 мм

Обычно регулировочную характеристику на переменном токе описывают аналогично дуге постоянного тока зависимостью в виде формулы Фрелиха:

$$U_d = A + BL_d,$$

где A – коэффициент, имеющий корреляционную связь с суммой приэлектродных падений потенциала, В; B – градиент напряжения, В/мм.

Однако экспериментальные регулировочные характеристики дуги переменного тока (рис. 18) показывают, что форма регулировочной характеристики дуги далека от кусочно-линейной, и только на первом и третьем участках вид кривой может быть описан формулой Фрелиха. На втором участке эта формула неприменима, поскольку зависимость резко нелинейная.

Из зависимостей (рис. 19) видно, что значение градиента напряжения в столбе дуги увеличивается с уменьшением длины дуги и соответствует данным литературы только при значительных длинах дуг (в данном случае более 50 мм).

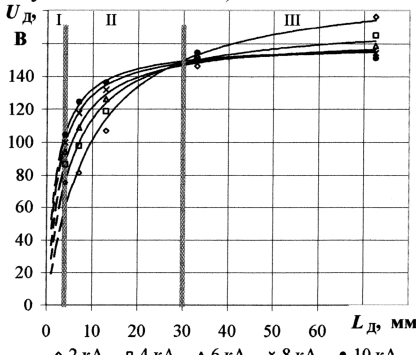


Рис. 18. Регулировочные характеристики дуги (ДСП-6)

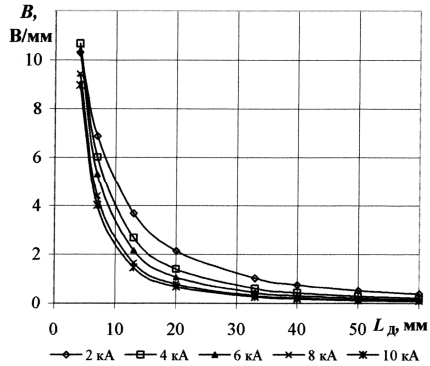


Рис. 19. Влияние длины дуги на коэффициент B

Из вышесказанного следует, что регулировочная характеристика дуги переменного тока в дуговой печи неоднозначна, а ее параметры зависят от рабочей длины дуги, которая растет с увеличением емкости печи.

На исследуемой печи при работе на жидком металле и сравнительно небольших длинах дуг значения B составляют 6–1,0 В/мм, что выше данных, полученных на печах большей вместимости.

Если коэффициент B определяется рабочей длиной дуги, то коэффициент A зависит от линейной плотности тока в электроде.

Приведенные данные говорят о том, что использовать формулу Фрелиха для определения связи напряжения дуги с ее длиной надо осторожно, особенно для печей малой и средней мощности.

При исследовании дуговых печей переменного тока большое внимание было уделено изучению регулировочных характеристик печей, представляющих собой зависимости параметров электрического режима самих печей при неизменной ступени напряжения трансформатора на определенном интервале времени:

$$P_d = f(L_d), \quad U_d = f(L_d), \quad I_2 = f(L_d).$$

Такие характеристики получены расчетным путем, исходя из электрических характеристик токоподвода и полученных экспериментально регулировочных характеристик дуги. Для повышения точности результатов были рассчитаны и экспериментально изучены активные и реактивные сопротивления контура печей с учетом влияния рабочего тока на значения этих сопротивлений («эффект нелинейности токоподвода»). Полученные данные достаточно хорошо совпадают с результатами измерений на печах во всем диапазоне возможной длины дуги (рис. 20).

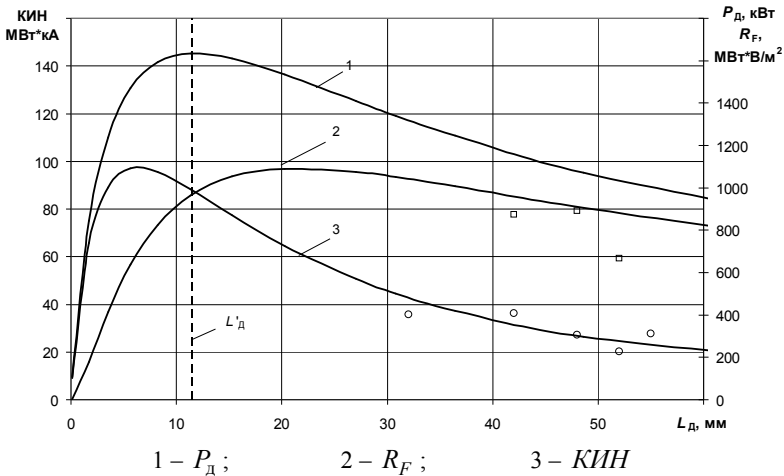
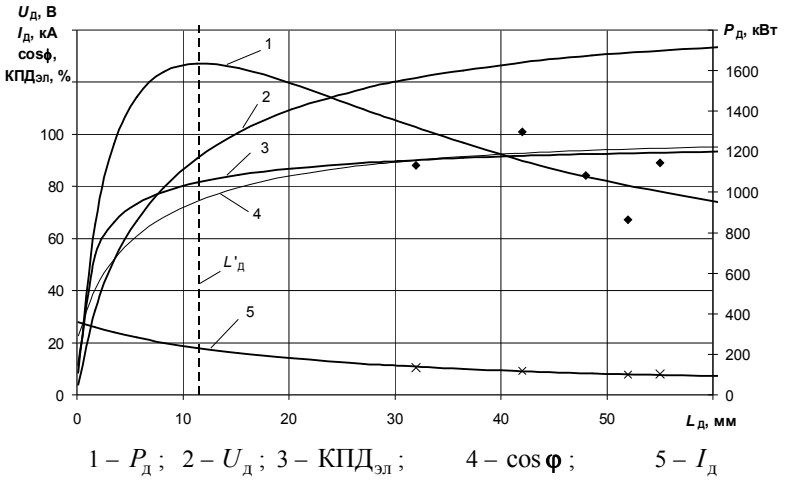


Рис. 20 – Регулировочные характеристики печи

Анализ результатов показывает, что ток инверсно зависит от длины дуги, а мощность дуги – экстремально с максимумом при длине дуги $L'_д$, которая различает режимы работы с «короткой» ($L_д < L'_д$) или «длинной» $L_д > L'_д$ дугой. Переход с «длинных» дуг на «короткие» вызывает снижение значений коэффициента мощности и электрического КПД.

Особо большой интерес вызывают результаты исследования электротехнологических параметров процесса плавки – коэффициента износа футеровки $R_F = \frac{3P_д U_д}{a^2}$ («коэффициент излучательной способности дуги») и коэффициента интенсивности нагрева металла $KИИ = 3P_д I$. Коэффициент износа футеровки R_F определяет интенсивность потока тепла в горизонтальном направлении. Значение коэффициента R_F в период расплавления при закрытой шихтой дуге влияет на скорость расплавления металла, а в период жидкого металла – на степень тепловых потерь и износ футеровки. Коэффициент $KИИ$ определяет долю тепла, передаваемого металлу от дуги, а в период жидкого металла – скорость нагрева ванны.

Проведенное исследование показало, что оба эти коэффициента зависят от длины дуги экстремально, причем экстремум R_F находится в диапазоне длинных дуг, а экстремум $KИИ$ – коротких дуг.

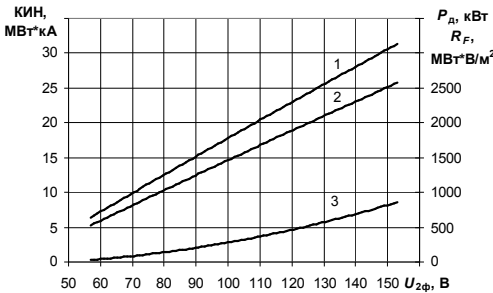


Рис. 21 – Влияние напряжения трансформатора на мощность дуги (1), коэффициент интенсивности нагрева (2) и коэффициент износа футеровки (3)

Значения $KИИ$ и R_F зависят и от питающего напряжения (рис. 21). Отсюда следуют основные направления выбора режимов в различные периоды плавки. В период расплавления необходимо работать с длинными дугами, обеспечивая повышение скорости расплавления шихты и высокие значения электрического КПД и коэффициента мощности.

В период жидкого металла желательны: уменьшение длины дуги с переходом на левую часть характеристики $P_д = F(L_д)$ и оптимизация коэффициента $KИИ$. При этом, к сожалению, придется работать с более низкими значениями коэффициента мощности и электрического КПД.

Четвертая глава посвящена вопросам использования результатов исследования для оптимизации режимов дуговых печей переменного трехфазного тока емкостью 6 тонн.

Анализу и дальнейшему синтезу режимов подвергались дуговые печи емкостью 6т с трансформаторами ЭТЦПК-6300/10 (представитель печь № 4) и ЭТДЦП-10000/10 (представитель печь № 6), используемые для выплавки стали и чугуна. Анализ показателей печей при существующих режимах показал, что ни по производительности, ни по расходу электроэнергии печи не удовлетворяли предъявляемым требованиям.

Общим критерием оптимизации режимов печей является минимизация себестоимости выплавки жидкой стали. Для разработки частных критериев был проведен анализ заводских данных по калькуляции себестоимости жидкого металла, который показал, что наиболее значимым фактором, определяющим влияние режимов и ряда производственно-организационных мероприятий на себестоимость жидкого металла, является производительность, доля в себестоимости которой составляет для чугуна 26,56 % и для стали 40,93 %. Важным является и удельный расход электроэнергии, однако его доля в себестоимости ниже и составляет для чугуна 8,18 % и для стали 9,20 %.

Отсюда следуют критерии оптимизации режимов для различных периодов плавки. В период расплавления необходимо обеспечить максимальную скорость плавки при выборе высокоомощных режимов с длинными дугами. В период жидкого металла повышение производительности связано с согласованием времени нагрева металла до температуры слива со стандартной продолжительностью технологических этапов (40 мин – окислительный период и 15 мин – восстановительный).

Такой режим работы связан с переходом на работу с короткими дугами и оптимизацией *КИИ*. Для определения такого режима были исследованы зависимости скорости нагрева металла от значения *КИИ* (рис. 22).

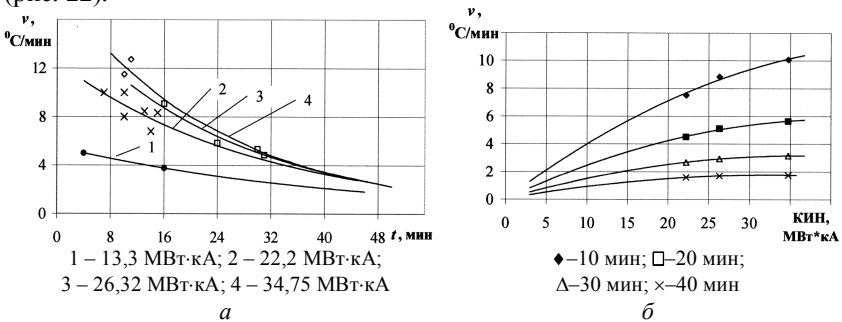


Рис. 22 – Зависимости скорости нагрева металла от времени нагрева (а) и от коэффициента интенсивности нагрева (б)

Для обоснования возможности работы при высокоомощных режимах были проанализированы допустимые токовые нагрузки всех элементов токоподводов. В результате чего была доказана возможность длительных рабочих токов до 15–18 кА. Даны рекомендации по замене по-

ставщика электродов с повышенной пропускной способностью. Проведенные работы позволили предложить новые режимы печей, которые и были внедрены на печах.

Основные показатели плавков по существующим и предложенным режимам печей №№ 4 и 6 представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что по предложенным режимам уменьшается длительность периода расплавления металла, что увеличивает производительность на этом этапе плавки. Также уменьшается удельный расход электроэнергии. Снижение длительности периода жидкого металла достигнуто за счет согласования периода нагрева металла и длительности технологических операций, что обеспечило минимизацию технологических «горячих» простоев.

Таблица 3
Сравнительные технико-экономические характеристики существующих и предложенных режимов*

№ печи	Период	Расплавление			Цикл		
		Показатель	сущ.	предл.	Δ	сущ.	предл.
4	t , мин	78,8	61,8	-17,0	223,0	164,3	-58,7
	G , т/ч	4,76	6,00	+1,24	1,68	2,26	+0,58
	w , кВт·ч/т	595,7	583,0	-12,7	928,7	834,8	-93,9
6	t , мин	70,7	58,7	-12,0	194,4	161,2	-33,2
	G , т/ч	4,95	6,95	+2,00	1,80	2,53	+0,73
	w , кВт·ч/т	565,6	552,0	-13,6	904,2	796,6	-107,6

* Δ – изменение показателей работы печей

Повышение производительности, снижение расхода электроэнергии и снижение длительности плавки позволили снизить себестоимость \bar{S} выплавки жидкого металла (табл. 4).

Таблица 4
Изменение себестоимости тонны жидкой стали при изменении показателей работы печей

№печи	Период	Показатель	
		Расплавление	Весь цикл
4	t , мин	-17,0	-58,7
	G , т/ч	+1,24	+0,58
	w , кВт·ч/т	-12,7	-93,9
	S , %	-11	-15
6	t , мин	-12,0	-33,2
	G , т/ч	+2,00	+0,73
	w , кВт·ч/т	-13,6	-107,6
	S , %	-17	-18

Выводы и результаты работы.

В работе проведены исследования электрических дуг, горящих в печах постоянного и переменного токов. Разработаны математические модели электродинамических взаимодействий (эффектов «сжатия», «электромагнитного дутья» и «мениска») и произведены расчеты электродинамических усилий в дуговых печах. Представлены результаты экспериментальных исследований и их объяснение.

1. Показано, что кроме конструктивных особенностей токопровода на величину отклонения столба дуги влияет длина дуги. Глубина мениска, как на постоянном, так и на переменном токе имеет примерно линейную зависимость от силы тока.
2. Показано, что в дуговой печи постоянного тока с расщепленным электродом происходит отклонение дуг к центру печи. Удаление дуг от стенок печи позволяет получить симметричное тепловое поле в рабочем пространстве печи и минимизировать явление горячих и холодных зон.
3. Регулировочные характеристики дуги постоянного тока позволили оценить влияние тока и длины дуги на градиент напряжения, который составляет в период жидкого металла от 0,2 до 1,6 В/мм.
4. Рекомендации для печи постоянного тока по использованию длинной дуги в начальный период плавки позволили: сократить длительность расплавления и снизить расход электроэнергии, а уменьшение длины дуги в период доплавания – снизить облучение футеровки стен и свода и, тем самым, повысить их срок службы.
5. Получено, что статическая ВАХ переменного тока при переходе от «короткой» к «длинной» дуге постепенно меняет характер от возрастающего – к падающему, что связано, по-видимому, с ростом доли излучения в теплообмене дуги с окружающим пространством.
6. Доказано, что в печах литейного класса градиент напряжения столба дуги в период жидкого металла гораздо выше (коэффициент B изменяется от 1 до 6 В/мм), поэтому для печей малой емкости нельзя использовать данные крупных печей.
7. Впервые изучены зависимости электротехнологических параметров R_F и $K_{ИН}$ в функции длины дуги. Показано, что совместное использование регулировочных характеристик печи и коэффициентов R_F и $K_{ИН}$ в функции длины дуги дают возможность анализировать и оптимизировать режимы работы печей.

- Использование предложенных режимов работы дуговых печей переменного трехфазного тока емкостью 6 тонн, расположенных в ООО «Чебоксарский завод промышленного литья» Концерна Тракторные заводы, позволило увеличить производительность, снизить расход электроэнергии и уменьшить себестоимость жидкого металла для печи № 4 на 15 % и для печи № 6 на 18 %.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК

- Михадаров, Д.Г. Влияние электродинамических явлений в дуговых печах на образование мениска в жидком металле / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // *Электрометаллургия*. – 2012. – № 6. – С. 36-41. (0,38 п.л./0,15 п.л.).
- Михадаров, Д.Г. Особенности электродинамических явлений в дуговой сталеплавильной печи постоянного тока с расщепленными электродами / Д.Г. Михадаров, Ю.М. Миронов // *Вестник Чувашиского университета*. – 2006. – № 2. – С. 243-250. (0,5 п.л./0,3 п.л.).
- Михадаров, Д.Г. Влияние межэлектродного промежутка на отклонение столба дуги / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // *Вестник Чувашиского университета*. – 2009. – № 2. – С. 139-142. (0,25 п.л./0,15 п.л.).
- Михадаров, Д.Г. Взаимосвязь технологических процессов со статической вольтамперной характеристикой дуги постоянного тока / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // *Вестник Чувашиского университета*. – 2011. – № 3. – С. 93-95. (0,19 п.л./0,1 п.л.).

В изданиях индексируемых в SCOPUS

- Mikhadarov, D.G. Effect of Electrodynamics Phenomena in Arc Furnaces on the Meniscus Formation in a Liquid Metal / Yu.M. Mironov, D.G. Mikhadarov // *Metally (Russian Metallurgy)*. – 2013. – Vol. 6. – PP. 471-475. (0,31 п.л./0,15 п.л.).

На международных конференциях

- Mihadarov, D.G. Influence of an Electric Arch on Liquid Metal in Arc Furnaces / J.M. Mironov, D.G. Mihadarov // XVII Congress UIE-2012. Energy efficient, economically, sound, ecologically respectful, educationally enforced electrotechnologies. – St. Petersburg, 21-25 May 2012. – 2 p. (0,12 п.л./0,1 п.л.).
- Михадаров, Д.Г. Исследование характеристик дуги постоянного тока / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Тезисы докладов XII-ой международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2008). – Алушта, 29 сентября – 4 октября 2008 г. – С. 312. (0,06 п.л./0,03 п.л.).

8. Михадаров, Д.Г. Параметры регулирования электрического режима дуговой печи / Д.Г. Михадаров // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Интеграционные процессы в науке в современных условиях», Казань, 8 ноября 2015 г. – С. 21-25. (0,31 п.л./0,2 п.л.).

Публикации в других изданиях

9. Михадаров, Д.Г. Электродинамические взаимодействия в дуговых печах постоянного тока / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Известия Академии электротехнических наук РФ. – 2010. – С. 31-34. (0,25 п.л./0,15 п.л.).

10. Михадаров, Д.Г. Анализ закономерностей образования мениска в жидком металле в дуговых печах / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Сборник докладов научно-технического семинара, посвященного 100-летию проф. М.Я. Смелянского. «Электротехнология в первом десятилетии XXI века». – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – С. 30-40. (0,69 п.л./0,3 п.л.).

11. Михадаров, Д.Г. Исследование скорости нагрева металла в дуговых сталеплавильных печах литейного класса/ Ю.П. Ананьин, Д.Г. Михадаров, В.Г. Петров, Е.Ю. Смирнова // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2003. – № 1. – С. 15-17. (0,19 п.л./0,05 п.л.).

12. Михадаров, Д.Г. Электродинамические явления в трехфазных дуговых печах / Ю.М. Миронов, Д.Г. Михадаров // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2006. – № 2. – С. 73-78. (0,38 п.л./0,2 п.л.).

13. Михадаров, Д.Г. Исследование статических и регулировочных характеристик дуги постоянного тока / Д.Г. Михадаров, Ю.М. Миронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2009. – № 2. – С. 41-43. (0,19 п.л./0,15 п.л.).

14. Михадаров, Д.Г. Электрические характеристики свободно горящей электротехнологической дуги / Ю.М. Миронов, А.Н. Миронова, Е.Ю. Зиновьева, Д.Г. Михадаров // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сборник научных трудов. Вып. 7. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – С. 179-195. (1,06 п.л./0,2 п.л.).

Личный вклад автора в работах, опубликованных и в соавторстве:

[1, 2, 5, 6, 9, 10, 12] – Разработка математической модели, проведение расчетов, проверка на совпадение с литературными и экспериментальными данными.

[8, 11] – Проведение экспериментов. Обработка данных.

[3, 4, 7, 13, 14] – Организация проведения исследований, постановка задачи, проведение экспериментов, обработка и интерпретация данных.

МИХАДАРОВ Денис Георгиевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДУГ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.01.2016 г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. 1,25
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 24.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии
ФГБОУ ВПО «ЧГУ имени И.Н. Ульянова»

428015, г. Чебоксары, Московский пр., д. 15.