Ткачев Александр Сергеевич. Исследование и оценка эффективности применения трубчатых электродов с целью снижения энергетических затрат при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах малой и средней вместимости: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.16.02 / Ткачев Александр Сергеевич;[Место защиты: Национальный исследовательский технологический университет МИСиС], 2016.- 184 с.

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический

университет «МИСиС»

На правах рукописи

Ткачев Александр Сергеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ

ВЫПЛАВКЕ СТАЛИ В ДУГОВЫХ

СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ

ВМЕСТИМОСТИ

Специальность 05.16.02 – «Металлургия чѐрных, цветных и редких

металлов»

Диссертация на соискание учѐной степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доцент, к.т.н. Кожухов А.А.

Москва 2016 год

2

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ  
ИССЛЕДОВАНИЯ 9

1.1 Современное состояние и тенденции развития дуговых сталеплавильных  
печей 9

1.2 Энерготехнологические особенности электроплавки стали в дуговых  
печах малой и средней вместимости 17

1. Возможность применения графитовых трубчатых электродов на дуговых сталеплавильных печах малой и средней вместимости 21
2. Выводы по главе 1 29 ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ХАРАКТЕР ГОРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ И ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОТНОШЕНИЯ ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЯ К ДИАМЕТРУ ЭЛЕКТРОДА 31

2.1 Общая характеристика параметров электрической дуги как источника  
тепловой энергии в дуговой сталеплавильной печи 31

2.2 Основные положения теории выдувания электрической дуги 41

2.3 Экспериментальное исследование влияния типа электрода на величину  
угла отклонения электрической дуги 44

2.4 Основные факторы, влияющие на расход и прочность электродов в  
процессе электроплавки стали 48

1. Лабораторные исследования по изучению влияния диаметра отверстия в трубчатых электродах на их расход и прочностные характеристики 56
2. Выводы по главе 2 60 ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДСП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ 62

3

3.1 Исследование облученности стен ДСП с применением трубчатых  
электродов 64

3.2 Изучение и оценка скорости расплавление шихты при использовании  
трубчатых электродов 76

3.3 Выводы по главе 3 78  
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДСП ПРИ  
ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МЕТОДОМ  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 79

4.1 Особенности тепловой работы ДСП 79

4.2 Методики расчета теплообмена в свободном пространстве дуговых  
печей 83

4.3 Разработка математической модели теплообмена в ДСП от  
электрических дуг 93

4.4 Сравнительный анализ теплообмена в рабочем пространстве ДСП при ее  
работе на трубчатых электродах 120

4.5 Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при  
использовании трубчатых электродов 124

4.6 Выводы по главе 4 127  
ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРУБЧАТЫХ  
ЭЛЕКТРОДОВ НА ДСП-6-2Н 128

5.1 Техническая характеристика дуговой сталеплавильной печи ДСП-6-2Н 128

5.2 Исследование эффективности применения трубчатых электродов на  
печах малой вместимости в условиях ОАО «ОЗММ» 134

5.3 Выводы по главе 5 141  
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 142  
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 144  
Приложение А 155  
Приложение Б 167  
Приложение В 175

4

**ВВЕДЕНИЕ**

**Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** В настоящее время производство стали в дуговых  
сталеплавильных печах (ДСП) является одним из наиболее эффективных и  
перспективных способов получения металла заданного химического состава. Это  
подтверждается постоянным ростом объемов производства электростали. К  
основным преимуществам ДСП можно отнести работу на твердой шихте при  
высокой скорости расплавления, что обеспечивает низкие удельные

капиталовложения и энергозатраты, более высокую производительность и  
меньшее количество выбросов вредных веществ в окружающую среду. Несмотря  
на выше перечисленные преимущества важным фактором развития

электросталеплавильного производства является внедрение различных

высокоэффективных способов интенсификации электроплавки. Это позволяет снизить удельный расход электроэнергии, сократить длительность плавки и повысить технико-экономические показатели работы ДСП. Сегодня большинство исследований направленно на повышение эффективности электроплавки стали в сверхмощных ДСП. Применительно к ДСП повышенной вместимости предложен ряд технологических и конструкционных приемов позволяющих существенно снизить как затраты производства стали так и повысить производительность агрегатов, однако прямой перенос этих предложений на ДСП средней и малой вместимости как правило малоэффективен либо практически невозможен. Исследований направленных на повышение эффективности электроплавки стали в ДСП малой и средней вместимости ограниченно. В связи с этим представляется актуальным поиск технологических приемов, обеспечивающих снижение энергоемкости производства стали в ДСП малой и средней вместимости, так как данные печи являются основными агрегатами для выплавки высоколегированных сталей и сплавов в различных отраслях промышленности (машиностроении,

5

авиастроении и др.). Одним из путей решения проблемы снижения энергетических затрат в печах малой и средней вместимости является проведение исследований направленных на изучения влияния трубчатых (полых) электродов на тепловые и технологические показатели работы печей данного типа, а так же оценка эффективности использования электродов данного типа на печах средней и малой вместимости.

Работа выполнена в рамках ФЦП "Исследования и разработки по  
приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса  
России на 2014-2020 годы". Соглашение о предоставлении субсидии №

14.578.21.0023 от «5» июня 2014 года по теме "Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники". Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0023.

**Цель работы:** Исследование влияния трубчатых электродов на тепловые и технологические показатели работы ДСП малой и средней вместимости и оценка эффективности их применения на печах данного типа с целью снижение энергетических затрат на выплавку электростали.

**Задачи исследования:**

1. Исследовать режим горения электрической дуги при использовании трубчатых электродов.
2. Исследовать эксплуатационные характеристики трубчатых электродов (прочность, удельный расход).
3. Исследовать влияние трубчатых электродов на характер распределения тепловых потоков в рабочем пространстве ДСП и оценить эффективность тепловой работы печи при их использовании.
4. Оценить технико-экономические показатели ДСП при применении трубчатых электродов.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Показано, что изменяя отношение диаметра отверстия в электроде (dотв) к

6

диаметру электрода (Dэл) можно получить определенную направленность тепловых потоков электрической дуги в рабочем пространстве ДСП, за счет изменения электромагнитной силы «выдувания» электрической дуги.

1. Установлено, что изменяя величину отношения внутреннего к внешнему диаметру трубчатого электрода (μ = dотв/Dэл) от 0,1 до 0,35 можно обеспечить снижение угла отклонения электрической дуги от оси электрода до 20° - 10°. При этом наибольший положительный эффект, наблюдается при μ = 0,1 исходя из критериев максимизации механической прочности и минимизации расхода электродов за счет окисления и эрозии рабочих торцов, обеспечивающее снижение энергетических затрат на выплавку электростали и повышение тепловых и технологических показателей работы ДСП, а именно повышение доли тепла передаваемой ванне на 15%, снижение доли излучения тепла на поверхность футеровки стен и свода на 9%.
2. Предложена аналитическая зависимость, которая позволит рассчитать угол отклонения электрической дуги от оси электрода в зависимости от величины отношения внутреннего к внешнему диаметру трубчатого электрода (μ).
3. Разработана компьютерная программа цифровой обработки видеоизображений позволяющая оценить угол отклонения электрической дуги от оси электрода, во время ее горения в рабочем пространстве дуговой печи; разработан алгоритм и программа расчета распределения тепловых потоков в рабочем пространстве печи, учитывающая геометрические размеры трубчатого электрода.

**Практическая значимость и реализация работы.**

1. Теоретически и экспериментально доказано, что применение трубчатых электродов в сравнении с типовыми (сплошными), позволяет повысить эффективность электроплавки стали на печах малой и средней вместимости, за счет снижения времени плавки и удельного расхода электроэнергии, а так же увеличения срока эксплуатации футеровки.

7

2. На основании результатов исследований предложена наиболее

рациональная величина μ = 0,1 для трубчатых электродов обеспечивающая снижение величины эрозии рабочих концов электродов на 9 % и повышение механической прочности на 10 % в сравнении с ранее предлагаемой величиной μ = 0,21.

На основе результатов промышленного опробования трубчатых электродов на ДСП емкостью 7 т. с величиной μ = 0,1 установлено, что их применение позволяет сократить общее время плавки в среднем на 13 мин., снизить удельный расход электроэнергии в среднем на 65 кВт\*ч/т, а так же увеличить срок эксплуатации футеровки на 16 %, что подтверждено актом проведения промышленных исследований на ОАО «ОЗММ».

**Достоверность научных результатов.**

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей

воспроизводимостью и согласованностью полученных данных с результатами промышленных экспериментов и литературных источников. Текст диссертации и автореферат проверены на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

**Апробация результатов работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и  
обсуждены на международных и региональных научно-практических

конференциях: областной конкурс научных молодежных работ «Молодежь Белгородской области», Белгород, 2009 г.; областная научно – практическая конференция «Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее», Белгород, 2009 г; всероссийская научно-практическая конференция «Череповецкие научные чтения – 2010» Череповец, 2010 г.; 5-я научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Безопасность технологических процессов» Москва НИТУ МИСиС,

1 Окороков Н.В., Никольский Л.Е., Егоров А.В. Эффективность работы дуговой печи на трубчатых электродах. //Электротермия, 1962, №9. с. 13-18.

8

2010 г.; 3-я научно-техническая конференция ОАО «ОЭМК» Старый Оскол, 2010 г.; 3-я всероссийская научно практическая конференция «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии 2011» Новокузнецк, 2011 г.; всероссийский смотр - конкурс научно-технического творчества «Эврика 2012», Новочеркасск, 2012 г.; 6-я международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология.» Москва НИТУ МИСиС, 2012 г.; 9-я международная научно-техническая конференция «Современная металлургия начала нового тысячелетия». Липецк, 2012 г.

**Публикации.**

По наиболее важным темам диссертационной работы имеется 26 публикаций в центральных и региональных изданиях, в том числе 7 статей в журналах, входящих в список ВАК.

**Структура и объем работы.**

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 108 наименований, 181 страницы печатного текста, иллюстраций, таблиц и приложений.

**На защиту выносятся:**

- результаты лабораторных исследований по изучению влияния трубчатых  
электродов на режим горения электрической дуги;

- результаты лабораторных исследований по изучению теплообмена в  
рабочем пространстве ДСП.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований доказана перспективность применения трубчатых электродов на ДСП малой и средней вместимости. Получены следующие основные выводы и результаты:

1. Доказано, что применение трубчатых электродов в сравнении с типовыми (сплошными), позволяет снизить угол отклонения электрической дуги от оси электрода с 45° до 10°. Установлено, что изменяя величину отношения внутреннего к внешнему диаметру трубчатого электрода (μ) от 0,1 до 0,35 можно обеспечить снижение угла отклонения электрической дуги от оси электрода с 20° до 10°.
2. Получено выражение позволяющее рассчитать угол отклонения электрической дуги от оси электрода в зависимости от отношения внутреннего к внешнему диаметру трубчатого электрода.
3. Определено рациональное отношение μ *=* 0,1, исходя из критериев максимизации механической прочности и минимизации расхода электродов за счет окисления и эрозии рабочих торцов электродов, обеспечивающее снижение энергетических затрат на выплавку электростали.
4. Разработана компьютерная программа цифровой обработки видеоизображений позволяющая оценить угол отклонения электрической дуги от оси электрода, во время ее горения в рабочем пространстве дуговой печи.
5. Разработан алгоритм и программа расчета распределения тепловых потоков в рабочем пространстве ДСП, учитывающая геометрические размеры трубчатого электрода.
6. Установлено, что изменение величины (μ) позволяет изменить направленность тепловых потоков в рабочем пространстве ДСП, а именно

143

повысить долю тепла передаваемой ванне на 15 %, снизить долю излучения тепла на поверхность стен и свода на 9 %.

7. Промышленными исследованиями на ДСП емкостью 7 т установлено, что применение трубчатых электродов позволяет сократить общее время плавки в среднем на 13 мин., снизить удельный расход электроэнергии в среднем на 65 кВт\*ч/т, а так же увеличить срок эксплуатации футеровки на 16 %, что подтверждено актом проведения промышленных исследований на ОАО «ОЗММ».

144

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Точиева, Л. Б. Металлургическое производство: мировой рынок стали в 2009-2011 гг. [Электронный ресурс] / Л. Б. Точиева // Аналитик ID – Marketing. – 2011. – Режим доступа: <http://id-marketing.ru/production/rinok-stali-v-mire-2011/>
2. Гудим, [Ю. А.](http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:177200/index.php?url=/auteurs/view/49343/source:default) Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография / [Ю. А.](http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:177200/index.php?url=/auteurs/view/49343/source:default) Гудим, И. Ю. [Зинуров,](http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:177200/index.php?url=/auteurs/view/350/source:default) А. Д. [Киселев.](http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:177200/index.php?url=/auteurs/view/348/source:default) – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010.–547 с.
3. Клейман, И. Э. Экономическая эффективность производства стали из чугуна с использованием ковшевого обезуглероживания : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05 / Клейман Илонна Эдуардовна. - М., 2005. -176 с.
4. Основы технологии производства стали*:* учебное пособие для вузов*.* Раздел ГРНТИ*:* Производство черных металлов и сплавов */* Д*.* Я*.* Поволоцкий -Челябинск : Изд*-*во ЮУрГУ*,* 2004 г*. –* 202 с.
5. Лазуткин, А. Е. Перспективные пути энергосбережения в доменном производстве России / А. Е. Лазуткин, А. Г. Чижиков, Е. Х. Шахпазов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2010. - № 1. - С. 1 – 8.
6. Фукс, Г. Технология производства стали в электродуговых печах в 21 веке / Г. Фукс, К. Гелер // Сталь. - 1999. - № 3. - С. 20 - 23.
7. Кнапп, Х. Перспективы производства стали в электропечах / Х. Кнапп // Сталь. – 2000. - №12. - С. 22 - 24.
8. Шалимов, А. Г. Отражение развития электросталеплавильного производства в России и СНГ / А. Г. Шалимов // Сталь. - 2006. - №11. - С. 73 - 75.
9. Еланский, Д. Г. Электрометаллургия стали - инновации в технологии и оборудовании / Д. Г. Еланский, Г. Н. Еланский, А. Я. Стомахин // Сталь. - 2009. -№8. - С. 35 - 40.

145

1. Лякишев, Н. П. Электрометаллургия - динамично развивающаяся отрасль сталеплавильного производства / Н. П. Лякишев // Сталь. - 2006. - №11. -С. 58 - 63.
2. Уточкин, Ю. И. Электрометаллургия России: достижения, проблемы, перспективы / Ю. И. Уточкин, А. Е. Семин // Электрометаллургия. – 2010. - №12.-С. 2 - 11.
3. В 2010 г. Россия выйдет на пиковые объемы производства стали образца 1990 г. – эксперт [Электронный ресурс] // Металлоснабжение и сбыт. – 2008. – Режим доступа: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/30464>
4. Смоляренко, В. Д. Современное состояние и перспективы развития электродуговых печей для выплавки стали / В. Д. Смоляренко, С. Г. Овчинников, Б. П. Черняховский // Сталь. - 2005. - №2 - С. 47 - 51.
5. К вопросу о глубинной продувке сталеплавильной ванны кислородом / Г. А. Лозин // Тр. 7 Конгр. сталеплавильщиков. - М. : Черметинформация, 2003. -с. 287 - 290.
6. Гуляев, М. П. Оптимизация технологий плавки в дуговой печи с донной продувкой инертными газами / М. П. Гуляев // Сталь. - 2002. - № 4. - С. 55 – 58.
7. Смирнова, Е. Ю. Использование тепла отходящих газов ДСП для подогрева шихты / Е. Ю. Смирнова, А. Н. Миронова // Электрометаллургия. - 2003. - № 10. -С. 13 - 19.
8. Ми парик, Ф. Дуговая сталеплавильная печь с шахтным подогревателем лома фирмы «Фукс Снстемтехник» / Ф. Минарик // Сталь. - 2000. - № 3. - С. 3 -5.
9. Лопухов, Г. А. Новая система подогрева лома для дуговой сталеплавильной печи / Г. А. Лопухов // Электрометаллургия. - 2000. - № 2. - С. 43 -44.
10. Поррачин, П. Роль вспенивания шлака в оптимизации тепловой работы ДСП переменного тока / П. Поррачин, Д. Онести, А. Гроссо, Ф. Миани // Сталь. -2005. - № 4 - С. 84 -86.
11. Ахметов, У.Б. Интенсификация плавления шихты в дуговых сталеплавильных печах путем оптимизации управления энергетическим режимом:

146

дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02, 05.13.06 / Ахметов Урал Булякбаевич. -Магнитогорск, 2008. – 155 с.

1. Рябов, А. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах : учебное пособие / А. В. Рябов, И. В. Чуманов, М. В. Шишимиров. - М. : Теплотехник, 2007.-192 с.
2. Модульная технология «Динарк» Danieli // Электрометаллургия. - 2007. -№ 8. - С. 44 -45.
3. Арджента, П. Выплавка электростали с непрерывной загрузкой горячей шихты / П. Арджента, М. Бианти Ферри // Электрометаллургия. - 2003. - № 5. -С. 27 -34.
4. Ломбардини, Э. Энерготехнологические преимущества работы ЭДП системой Consteel / Э. Ломбардини, П. Арджеита // Электрометаллургия. - 2004.-№ 6. - С. 41 -47.
5. Рушно, Э. Электродуговая печь с системой динамического автоматического регулирования фирмы Danieli / Э. Рушно, К. Бергман, С. Олунд // Электрометаллургия. - 2005. - № 8. - С.42 -48.
6. Лапшин, И.В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И. В. Лапшин. - М.: ООО «Квадратум», 2002.-157 с.
7. Смоляренко, В. Д. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития / В. Д. Смоляренко // Электрометаллургия. - 2003. - № 11. - С. 12 -19.
8. Лопухов, Г. А. FAST - бесшлаковая система выпуска стали из дуговой печи / Г. А. Лопухов // Электромегаллургия. - 2004. - № 11. - С. 43 -47.
9. Лопухов, Г. А. Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах / Г. А. Лопухов // Электрометаллургия. - 2005. - № 3. - С. 2 -27.
10. Стомахин, А. Я. Электросталеплавильное производство / А. Я.Стомахин // Электрометаллургия. - 2005. - № 3. - С. 35 -37.
11. Теплов, А.В. Создание системы оптимизации мощности дуги на ДСП-150 / А. В. Теплов, Ю. И. Вареников, А. Н. Иванов // Сталь. - 2009. - № 12. - С. 30 - 32.

147

1. Комаров, О.А. Особенности модернизации электросталеплавильного цеха ОАО ОЭМК / О. А. Комаров, О. В. Вершинин, В. Г. Коберник, Г. А. Комаровский, М. А. Серкин // Сталь. – 2009. - № 12. - С. 27 – 28.
2. Сазонов, А. В. Исследование процесса плавки окатышей при дуговом нагреве в печи с полыми электродами с целью энергосбережения : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Сазонов Александр Васильевич. - М., 2009. – 231 с.
3. Окороков, Б. Н. Некоторые особенности дуговых печей как металлургических агрегатов / Б. Н. Окороков, М. М. Крутянский // Электрометаллургия. - 2003. - № 6. - С. 15 – 18.
4. Федина, В.В. Разработка энергосберегающего режима плавления металлизованных окатышей в дуговой сталеплавильной печи с целью повышения эффективности производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Федина Виктория Викторовна. - М., 2003. – 205 с.
5. Миронова, А. Н. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей : учебное пособие / А. Н. Миронова; под ред. Ю. М. Миронова. – Чебоксары : Изд-во чуваш, унта, 1999.-154 с.
6. Никольский, Л. Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л. Е. Никольский, В. Д. Смоляренко, Л. Н. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1981.-320 c.
7. Петров, В. Г. Исследование закономерностей тепловых режимов дуговых сталеплавильных печей литейного класса : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.10 / Петров Владимир Геннадьевич. - Чебоксары, 2005. – 140 с.
8. Ерофеев, М. М. Обработка стали в агрегате ковш-печь при подаче инертного газа через полые электроды : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Ерофеев Михаил Михайлович. - Магнитогорс, 2007. – 154 с.
9. Егоров, А. В. О применении трубчатых электродов в дуговых печах / А. В. Егоров, Л. Е. Никольский, Н.В. Окороков // Электрометаллургия. – 1962. - № 9 -С. 27 - 31.
10. Якшук, Д. С. Влияние состава металлошихты на содержание азота в кордовой стали / Д. С. Якшук, В. В. Эндерс, Е. И. Лейнвебер, Ю. В. Дьяченко //

148

Сталь. – 1998. - № 11. - С. 29 – 31.

1. Поляков, И. И. Исследование продувки парогазовой смеси через электроды ферросплавной печи / И. И. Поляков, Г. М. Махонь, И. Т. Жердев, В. А. Кравченко, Е. Г. Цыбульник // Изв. вуз. Черная металлургия. - 1980. - № 11 -С. 59 – 61.
2. Солдаев, А. Н. Повышение эффективности обработки металла с использованием стабилизированных дуг : Сборник «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства» / А. Н. Солдаев, Е. Б. Агаников -Череповец, 2003. - С. 63 – 64.
3. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи / А. Д. Свенчанский, М. Я. Смоленский - М.: Энергия, 1970. - 264 с.
4. Кнооп, Р. Управление режимом плавки в дуговой электропечи переменного тока с целью защиты холодильников стен печи / Р. Кноп, Р. Лихтенбен, 3. Келе, Ю. Зинг // Черные металлы. - 1997. - № 7. -С. 8 -13.
5. Кожеуров, В. Н. Повышение точности системы управления приводом перемещения электродов дуговой сталеплавильной печи за счет позиционирования нелинейной характеристики регулятора : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Кожеуров Владимир Николаевич. - Екатеринбург, 2007. - 137 с.
6. Лапшин, И. В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И. В. Лапшин. - М.: ООО «Квадратум», 2002. — 157 с.
7. Волос, Д. И. Исследование теплообмена в свободном пространстве дуговой сталеплавильной печи и разработка методики расчета ее водоохлаждаемых элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Волос, Дмитрий Иванович. -Череповец, 2005. - 140с.
8. Aminorroaya, S. The Effect of Foamy Slag Formation on Electrical Energy Consumption of EAF / S. Aminorroaya, H. Edris // Esteghlal, Vol. 21, 2002. - № 1 -p. 195-206.
9. Сисоян, Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. Текст / Г. А. Сисоян. - М.: Металлургия, 1974.-304 с.

149

1. Пирожников, Е. Е. Автоматизация контроля и управления электросталеплавильными установками. Текст / Е. Е. Пирожников, А. Р. Каблуковский - М.: Металлургия, 1974.-208 с.
2. Спелицин, Р. И. Исследование заглубления электрической дуги в жидкую ванну в условиях высокомощных сталеплавильных печей. Текст / Р. И. Спелицин // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. - 1975. - № 12. -С. 10 -11.
3. Окороков, Н. В. Дуговые сталеплавильные печи / Н. В. Окороков. - М.: Металлургия, 1971.-344 с.
4. Егоров, А. В. Электроплавильные печи черной металлургии. Текст / А. В. Егоров. - М.: Металлургия, 1985.-144 с.
5. Макаров А.Н. Теория теплообмена излучением в дуговых печах для плавки стали: дис. ... докт. техн. наук : 05.09.10 / Макаров Анатолий Николаевич. - Тверь, 1994. - 354 с.
6. Лисиенко, В. Г. Теплофизика металлургических процессов / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. - М.: Металлургия, 1982.-239 с.
7. Гитгарц, Д. А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микроЭВМ / Д. А. Гитгарц. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-135 с.
8. Jones, R. T. DC arc photography and modeling / R. T. Jones, Q. G. Reynolds, M. J. Alport // Mineral Engineering, Volume 15, Issue 11S1, pp.985 - 991
9. Мюллер, Х. Г. Дуговая печь на постоянном токе для экономичных процессов плавки / Х. Г. Мюллер, А. А. Патуцци, Э. Х. Никс. // МРТ. - 1994. - с. 10 - 20.
10. AO N., Maki T., Tanahashi A., Nakamura T., Iguchi K. Operating Results of a DC Arc Furnace and Properties of DC Arcs, 1 & SM, September 1990, p. 14-15.
11. Ткачев, A. C. Экспериментальное изучение влияния полого (трубчатого) электрода на характер горения электрической дуги в дуговой сталеплавильной печи / A. C. Ткачев, A. A. Кожухов, E. H. Мельников // Изв. вуз. Черная металлургия. - 2015. - № 3. - С. 207 - 209.

150

1. Электроды [Электронный ресурс] // Металлургия. – 2012. – Режим доступа: <http://metallurgiya.net/elektrometallurgiya/42-yelektrody.html>
2. Электроды дуговых печей // Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков информационный портал о черной и цветной металлургии. - Режим доступа: <http://uas.su/books/2011/dsp/32/razdel32.php>
3. Боборин, С. В. Исследование работы погруженных в шлаковый расплав металлических электродов с целью создания нерасходуемого электрода для многошлаковых электропечей медноникелевого производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Боборин Сергей Валентинович. - Санкт-Петербург, 2002. – 147 с.
4. Малиновский, В. С. Технико-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах / В. С. Малиновский, Ф. Е. Дубинская // Электрометаллургия. – 1999. - № 3. - С. 8 - 16.
5. [Малиновский, В. С. Дуговые печи нового поколения / В. С. Малиновский,](http://www.ntfecta.ru/default.asp?page=41&pub=2) Л. В. Ярных // Металлургия машиностроения. – 2001. - № 1.
6. Поволоцкий, Д. Я. Электрометаллургия стали и ферросплавов / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс и др. - М.: Металлургия, 1974.-551с.
7. Сапиро, B. C. Об уровне и характере облученности футеровки высокомощной 100-тдуговой сталеплавильной печи. Текст / B. C. Сапиро, С. Н. Тимошенко, А. Б. Чернышев, Г. Г. Житник, Г. С. Легостваев, Е. М. Браверманн // Известия вузов. - 1981. - № 3. – С. 63 - 66.
8. Снитко, Ю. П. Расчет энерготехнологического режима работы ДСП-100И6 в период нагрева металла / Ю. П. Снитко, И. М. Оржех // Сталь. - 1989. - № 8. -С. 34 – 36.
9. Сосонкин, О. М. Особенности теплообмена в дуговой сталеплавильной печи / О. М. Сосонкин, М. В. Шишимиров // Сталь. - 2004. - № 8. - С. 34-36.
10. Поволотский, Д. Я. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Д. Я. Поволотский, Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров - М.: Металлургия, 1990.-176 с.

151

1. Легостаев, Г.С. Совершенствование конструкции и режима работы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Легостаев Геннадий Семенович. - Донецк, 1985. – 172 с.
2. Bowman, В. Major Developments in arc furnace technology over the last fourdecades / В. Bowman // Inst. Argentino, Paper presented at Aceria, 11 Seminaro, BuenosAires, Nov. 26-28. 1997. - 7p.
3. Ткачев, А. С. Исследование облученности стен дуговой сталеплавильной печи с применением электродов различной конструкции / А. С. Ткачев, А. А. Кожухов, Э. Э. Меркер // Известия вузов. Черная металлургия. - 2012. - № 9 -С. 17 - 20.
4. Микулинский, А. С. [Определение параметров руднотермических печей на основе теории подобия](http://padabum.com/d.php?id=26172) / А. С. Микулинский. – Л.-М. : Энергия, 1961.-88 с.
5. Гухман, А. А. Физические основы теплопередачи / А. А. Гухман. – Л.-М. : Госэнергоиздат, 1934.
6. Окороков, Н. В. Эффективность работы дуговой печи на трубчатых электродах / Н. В. Окороков, Л. Е. Никольский, А. В. Егоров // Электротермия. -1962. - № 9. - С. 13 - 18.
7. Свенчанский, А. Д. Определение тепловых потоков дуг в сталеплавильных печах / А. Д. Свенчанский, А. Н. Макаров // Электротермия. - 1982. - № 6 - С. 6 - 8.
8. Глинков, Г. М. Общая теория тепловой работы печей. Учебник для вузов / Г. М. Глинков, М. А. Глинков. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1990. – 232 с.
9. Самохвалов, Г. В. Электрические печи черной металлургии / Г. В. Самохвалов, Г. И. Черныш. - М. : Металлургия, 1984. – 232 с.
10. Свенчанский, А. Д. Расчѐты теплообмена излучением и прогнозирование износа футеровки в ДСП. Электротермические процессы и установки / А. Д. Свенчанский, А. Н. Макаров // Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 1984. - С.3-7.
11. Невский, А. С. Лучистый теплообмен в печах и топках / А. С. Невский. -М. : Металлургия, 1971. – 440 с.

152

1. Jasukawa S., Nakamura А. —«Engineering Review», 1975, № 3, September, p. 46 - 51.
2. Макаров, А. Н. Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов : монография / А. Н. Макаров. – Тверь : ТГТУ, 2003.-348 с.
3. Леушин, А. И. Дуга горения / А. И. Леушин. - М. : Металлургия, 1979.-240 с.
4. Игнатов, И. И. Математические модели теплообмена в ДСП / И. И. Игнатов. - Сб.тр. : ВНИИЭТО. - 1983. - С.3-14.
5. Макаров, А. Н. Вопросы теплообмена в электротермических установках / А. Н. Макаров, А. Д. Свенчанский. - М. : Энергоатомиздат, 1983.-С.67-72.
6. Макаров, А.Н. Расчет потоков излучения на ванну металла при наклонном положении плазмотронов в плазменно-дуговых печах / А. Н. Макаров // Известия вузов. Черная металлургия. - 1991. - № 8. - С.55- 57.
7. Макаров, A. Н. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей / A. Н. Макаров, А. Д. Свенчанский. - М. : Энергоатомиздат, 1992.-96 с.
8. Макаров, А. Н. Математическая модель дуговых электротепловых преобразователей для автоматизации плазменно-дуговых сталеплавильных печей: Сб.тр. / А. Н. Макаров. - Тверь : Тверской политех.ин-т., 1992. - С.64-69.
9. Свенчанский, А. Д. Определение тепловых потоков дуг в сталеплавильных печах / А. Д. Свенчанский, A. Н. Макаров // Электротехническая промышленность. Сер.Электротермия. - 1982. - № 6. - С. 6 - 8.
10. Казаков, О. А. Исследование распределения потоков излучения от дуг на поверхность жидкого металла в трехфазных электродуговых установках методом математического моделирования / О. А. Казаков // Тезисы докладов. IV всесоюзная конференция по тепло- и массообменным процессам в ваннах сталеплавильных агрегатов. - Жданов, 1986.- С. 141
11. Просвирников, Р. А. Математическое моделирование дуги как источника излучения / Р. А. Просвирников, О. А. Казаков, Г. А. Фарнасов // Известия вузов. Черная металлургия. - 1987. - № 5. - С. 155 - 156.

153

1. Казаков, О.А. Разработка и использование моделей дуги как источника излучения для исследования тепловой работы электродуговых металлургических установок / О. А. Казаков, Р. А. Просвирникова, Г. А. Фарнасов, О. Н. Шнейтер // Тезисы докладов. VI Всесоюзная научная конференция по современным проблемам электрометаллургии стали. - Челябинск, 1987. - С.168
2. Казаков, О. А. О математической модели свободногорящсй сильноточной дуги / О. А. Казаков, Р. А. Просвирникова, Г. А. Фарнасов // Тезисы докладов. Научная конференция по перспективам применения плазменной техники и технология в металлургии. - Челябинск, 1988. - С.86.
3. Jonas, Alexis Modeling of DC Electric Arc Furnace - Heat transfer from the arc. / Jonas Alexis, Marco Ramirez, Gerardo Trapaga, Par Jonsson // ISIJ International, Vol.40 (2000), No.11. pp. 1089-1097
4. Jonas, Alexis Modeling of DC Elcctric Arc Furnace - Mixing in the Bath / Jonas Alexis, Marco Ramirez, Gerardo Trapaga, Par Jonsson // ISIJ International, Vol.41 (2001), No. 10, pp.1146-1155
5. Bowman, B. The physics of high-current arcs / B. Bowman, G. Jordan, F. Fitzgerald // Iron & Steel Inst., June 1969, pp.798-804
6. Bowman, B. Properties of arcs in DC furnaces / B. Bowman // Electric Furnace Conference Proceedings, 1994, pp.11-120
7. Bowman, B. Effects on furnace arcs of submerging by slag / B. Bowman // Iron and Steelmaking, 1990. No.2
8. Bowman, B. Physics of arcs submerged in foaming slag / B. Bowman // Associazione Italiana di Metallurgia Symposium, Slag Foaming in Steelmaking, Milan, Italy, March 8, 1990.
9. Bowman, B. Graphite consumption in arc furnaces / B. Bowman // Electric arc Melting Furnaces Conference, Varna, Bulgaria, May, 1985.
10. Bowman, B. Development of the AC arc furnace / B. Bowman // Xi'an Symposium on Electric Steelmaking Installations, Sept.1993. 14 p.

154

1. Montgomery, R. W. Comission of the European Comunities Pamphelct EUR. No 5716. pp.l35.
2. Guzovic, Zvonimir Analytical model of radiative heat transfer in electric arc furnace / Zvonimir Guzovic, Branemir Matijasevic, Zelko Tukovic. // Third International Symposium on Radiative Transfer.2001. Antalya, Turkey
3. Владимиров, В. А. Определение размеров горячих пятен на поверхности жидкой ванны электродуговой печи / В. А. Владимиров, С. И. Герцык // Изв. вуз. Черная металлургия. - 1987. - № 1. - С. 51 - 54.
4. Макаров, А. Н. Распределение потоков излучения дуг в дуговых сталеплавильных печах трехфазного и постоянного токов в период расплавления / А. Н. Макаров, Р. А. Макаров // Изв. вуз. Черная металлургия. - 1998. - № 2. С. 11-14.
5. Ткачев, А. С. Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при использовании различных типов электродов на современных дуговых сталеплавильных печах / А. С. Ткачев, А. А. Кожухов, Э. Э. Меркер // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. - № 11. - С. 14 – 17.