

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 чёрных, цветных и редких металлов»

Диссертация на соискание
учёной степени кандидата
технических наук

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

Москва 2016 год

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
1.3 Возможность применения графитовых трубчатых электродов на дуговых сталеплавильных печах малой и средней вместимости	21
1.4 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
2.5 Лабораторные исследования по изучению влияния диаметра отверстия в трубчатых электродах на их расход и прочностные характеристики	56
2.6 Выводы по главе 2	60
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ДСП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ	62

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

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 конструктивных 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 ограничено. 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,

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 ($d_{отв}$) к

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

2. Установлено, что изменяя величину отношения внутреннего к внешнему диаметру трубчатого электрода ($\mu = d_{отв}/D_{эл}$) от 0,1 до 0,35 можно обеспечить снижение угла отклонения электрической дуги от оси электрода до $20^\circ - 10^\circ$. При этом наибольший положительный эффект, наблюдается при $\mu = 0,1$ 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%.

3. 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).

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; 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.

2. На основании результатов исследований предложена наиболее рациональная величина $\mu = 0,1$ для трубчатых электродов обеспечивающая снижение величины эрозии рабочих концов электродов на 9 % и повышение механической прочности на 10 % в сравнении с ранее предлагаемой величиной $\mu = 0,2^1$.

На основе результатов промышленного опробования трубчатых электродов на ДСП емкостью 7 т. с величиной $\mu = 0,1$ 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 Огороков Н.В., Никольский Л.Е., Егоров А.В. Эффективность работы дуговой печи на трубчатых электродах. //Электротермия, 1962, №9. с. 13-18.

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.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Современное состояние и тенденции развития дуговых сталеплавильных печей

В настоящее время одним из самых эффективных способов выпуска стали и сплавов, необходимого химического состава, является выплавка стали в дуговых сталеплавильных печах. За последние десятилетия наблюдался рост объемов производства стали в мире (рис. 1.1) [1].

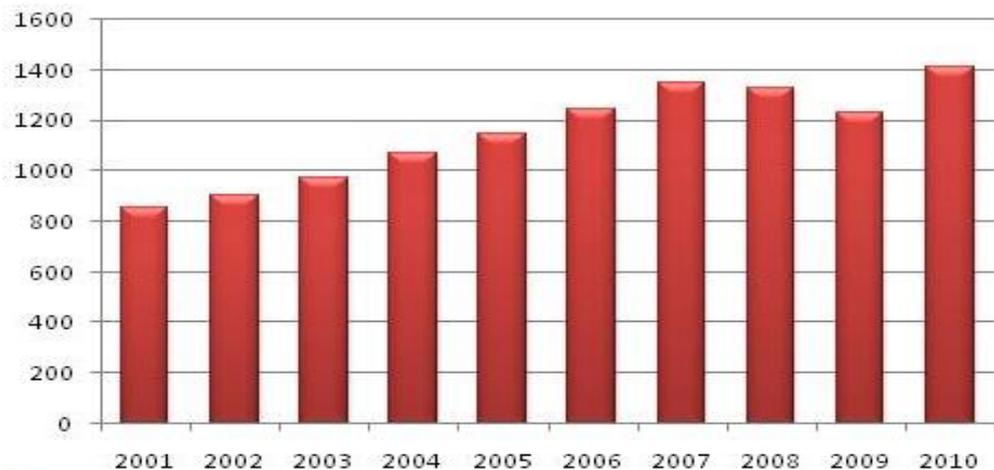


Рисунок 1.1 - Динамика производства стали в мире в 2001-2010 гг., млн.
ТОНН

Прогресс в развитии электротехники, машиностроения, производства электродов и огнеупоров скачкообразно интенсифицировал технологию электроплавки стали, начиная с последней четверти XX века. Произошло это благодаря широкому применению сверхмощных дуговых печей и разработки современной технологии плавки для данного типа печей, а так же росту выработки электроэнергии [2].

Увеличение ежегодных объемов производства электростали, привело к постепенному вытеснению мартеновского способа плавки, а в некоторых странах, таких как Япония, нескольких странах Западной Европы и США, вытеснению и

конвертерного способа [3, 4]. За последние два десятилетия объем производства стали в мире в ДСП непрерывно возрастает, хотя его доля остается неизменной (33 – 34 %) (рис. 1.2) [5 - 7].

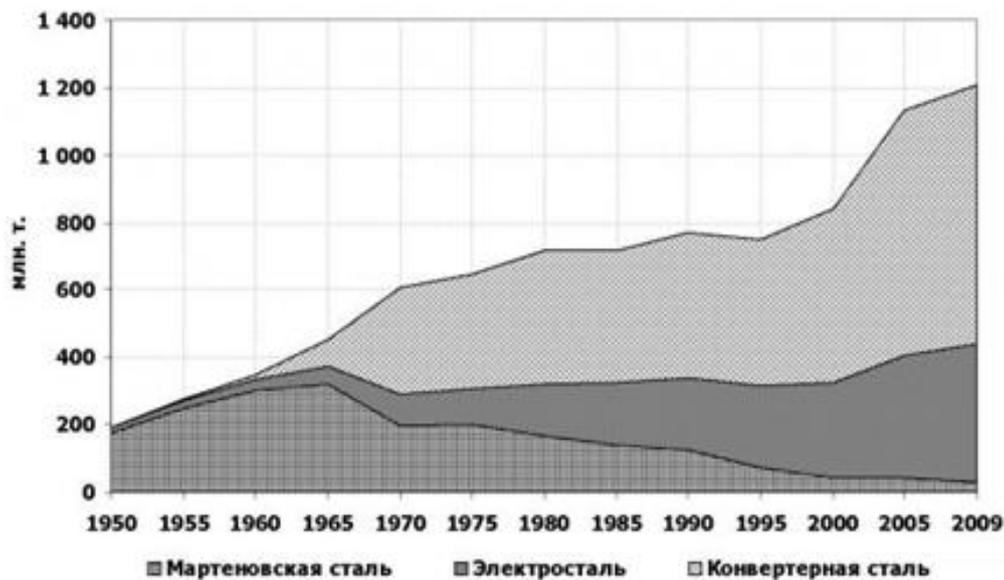


Рисунок 1.2 - Мировая динамика способов производства стали

Большинство ведущих производителей считают электрометаллургию наиболее современной и эффективной технологией выплавки стали [8]. На 2006 год наибольшая доля электростали от общего объема выплавки достигнута в Италии и составила 63 %. Начало строительства и развития металлургического комплекса в данной стране легло на 60-е годы 20 века, поэтому доля электростали в Италии, была изначально высока. Следовательно, уровень технологий, гораздо выше, в сравнении со странами, где начало развития металлургии произошло намного раньше с освоения мартеновских печей [3]. Доля электростали в других странах составляет: США – 58 %, Индия – 50 %, Республика Корея – 45 %, ФРГ – 32 %, Бразилия – 24 %, Россия – 18 %, Украина – 10 % [9]. Следует отметить высокую долю электростали в странах, где черная металлургия была создана и/или интенсивно развивалась в последние десятилетия 20 – го века, а также то, что почти в 40 странах мира (Португалии, Индонезии, Малайзии, Саудовской

Аравии и др.) электросталеплавильный процесс - единственный способ выплавки стали [10].

Похожие тенденции увеличением доли электростали намечаются и в структуре сталеплавильного производства России [11]. В доказательство этому, необходимо отметить, что уже в 2005 году в России впервые выплавлено электростали столько же (13,5 мил.т.), сколько мартеновской (13,5 мил. т.) [10], а за период с 2000 по 2007 год объем выплавки электростали увеличился в 2,2 раза, доля электростали в общей выплавке стали увеличилась с 14,7 % до 26,7 %. Существенно обновился парк электропечей. Если в начале 2004 г. современных сверхмощных ДСП эксплуатировали всего две (на предприятиях ОАО «Северсталь» и ООО «Металлургический завод Камасталь»), то в результате модернизации, а главным образом пуска новых печей, их число в настоящее время превысило 20 вместимостью от 40 до 185 т. Таким образом, отечественная электрометаллургия за последние годы сделала настоящий количественный, да и во многом качественный рывок, позволивший заметно приблизиться по этому показателю к ведущим странам-производителям стали.

В соответствии со стратегией развития металлургического комплекса структура сталеплавильного производства в дальнейшем будет меняться в сторону роста объема электростали, так к 2015 г. доля электростали должна увеличиться до 33% при снижении доли мартеновского производства до 1-2 % [11, 12].

Высокая доля электростали в промышленно развитых и развивающихся странах обусловлена преимуществами ДСП, работающими на твердой шихте при высокой скорости расплавления. Это обеспечивает меньшие удельные капиталовложения и энергозатраты, более высокую производительность и меньшее количество выбросов вредных веществ в окружающую среду. Сортамент сталей, выплаваемых в ДСП (от простой углеродистой и низколегированной до специальных высоколегированных сталей и сплавов), гораздо шире, чем в других агрегатах. Электроплавка отличается большей эффективностью в использовании

металошихты разного состава, меньшими издержками производства, возможностью мобильного реагирования на изменения потребности рынка [10]. Для выполнения заказов малого объема, в период ухудшения экономической конъюнктуры, электропечи очень удобны, так как могут работать периодически, что является значимым преимуществом в условиях рыночной экономики.

Основными факторами, способствующими развитию дуговых сталеплавильных процессов, являются:

1. При работе на ДСП продолжительность плавки незначительно различается с временем доводки металла в агрегатах внепечной обработки стали (ВОС) и продолжительностью разливки стали на машине непрерывной разливки стали (МНЛЗ), что дает возможность создания непрерывной цепочки ДСП - ВОС - МНЛЗ с равной загрузкой оборудования;

2. Для внедрения систем механизации и автоматизации ДСП приспособлены лучше других агрегатов;

3. ДСП подходят для выплавки большинства марок стали вне зависимости от содержания углерода и легирующих элементов (максимальное суммарное содержание легирующих элементов более 35 %);

4. При выплавке стали в ДСП допускается очень широкое варьирование показателя соотношения чугуна-лом в отличие от, кислородно-конвертерных процессов, в которых данное соотношение должно соблюдаться довольно жестко [3];

5. Улучшение качества графитированных электродов и совершенствования конструкции печей позволяют снизить затраты на электроды;

6. Возможность использования в качестве металлической шихты жидкого чугуна и металлизированных окатышей (МО).

Одной из негативных моментов, влияющих на развитие электросталеплавильного производства, является возрастающая загрязненность металлолома различными примесными элементами, такими как медь и олово, которые могут явиться препятствием при выпуске некоторых типов продукции,

например тонкого листа [3]. Однако использование таких шихтовых материалов, как жидкий чугун и МО позволят в будущем решить эту проблему.

Преимущества дуговой печи, описанные выше, показывают, что электросталеплавильное производство как в России, так и во всем мире имеет в обозримом будущем хорошие перспективы развития. Производительность современных ДСП практически сравнялось с кислородными конверторами. Следовательно, во всем мире для выплавки рядовых марок сталей предпочитают строить электросталеплавильные заводы или электросталеплавильные цеха на существующих заводах. Состояние мировой энергетики и мировые ресурсы лома позволяют продолжать развитие в данном направлении [2].

Важным фактором развития электросталеплавильного производства стало внедрение различных высокоэффективных способов интенсификации плавки. Что позволило снизить удельный расход электроэнергии, длительность плавки, повысить технико-экономические показатели ДСП и сравнять их по производительности с современными кислородными конверторами [2, 13].

Основными способами интенсификации плавки в современной дуговой печи являются:

1) использование топливокислородных горелок для подогрева лома в печи и ускорения его расплавления;

2) окисление углерода, который дополнительно вводится в печь, газообразным кислородом с целью получения дополнительного тепла от экзотермических реакций окисления компонентов шихты;

3) окисление части железа шихты газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла от экзотермических реакций окисления компонентов шихты и ускорения формирования окислительного основного шлака;

4) использование спец фурм для дожигания CO до CO₂ в рабочем пространстве печи с целью увеличения прихода тепла от окисления углерода;

5) применение газообразного кислорода для ускоренного окисления избыточного количества углерода металла в окислительный период плавки [2];

6) применение донной или глубинной продувки расплава кислородом или чаще инертным газом для ускорения плавления и нагрева, а также уменьшения угара металла за счет лучшего перемешивания расплава [2, 14, 15];

7) использование в шихте жидкого чугуна с целью увеличения скорости расплавления стального лома за счет физического тепла чугуна и дополнительного прихода тепла от экзотермических реакций окисления примесей [2];

8) использование физического тепла отходящих печных газов для подогрева лома [2, 16 -18];

9) применение ряда технологических мероприятий для ускорения расплавления шихты и нагрева металла: работа на «болоте», использование вспененного шлака [2, 19];

10) использование специально подготовленной шихты (измельченного лома) [2];

11) применение двухкорпусной конструкции с целью снижения времени работы печи в безтоковом режиме [20 - 22];

12) применение непрерывной загрузки шихты или металлизированных продуктов с предварительным подогревом [20, 23, 24];

13) использование высокоэффективных методов подвода электроэнергии для ведения электроплавки на рациональных энерготехнологических режимах [20, 25, 26];

14) применение высококачественных графитированных электродов, позволяющих работать при повышенной плотности тока и обладающие высокой механической прочностью [20, 27];

15) модернизация способа выпуска жидкой стали из печи по системе FAST [20, 28];

16) применение ДСП как высокопроизводительный технологический агрегат для расплава шихтовых материалов с дальнейшим переводом

технологических операций в установки и агрегаты внепечной обработки стали [20, 29, 30].

Целесообразность применения способов интенсификации плавки в ДСП должна определяться для определенных условий конкретного предприятия с учетом получаемых экономических (дополнительные вложения капитала, цена шихтовых материалов, электроэнергии, газа и т.д.), эксплуатационных (стойкость футеровки, расход электродов, и т.д.), технологических (выход годного, качество металла, удобства применения) и энергетических параметров применяемого процесса [2].

В качестве примера широкого применения различных методов интенсификации можно привести электросталеплавильный цех (ЭСЦ) ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (ОЭМК), где в период с 1996 по 2010 г удалось увеличить годовое производство вдвое, превысив тем самым проектную производительность цеха на 1 миллион 820 тысяч тонн. (рис. 1.3).

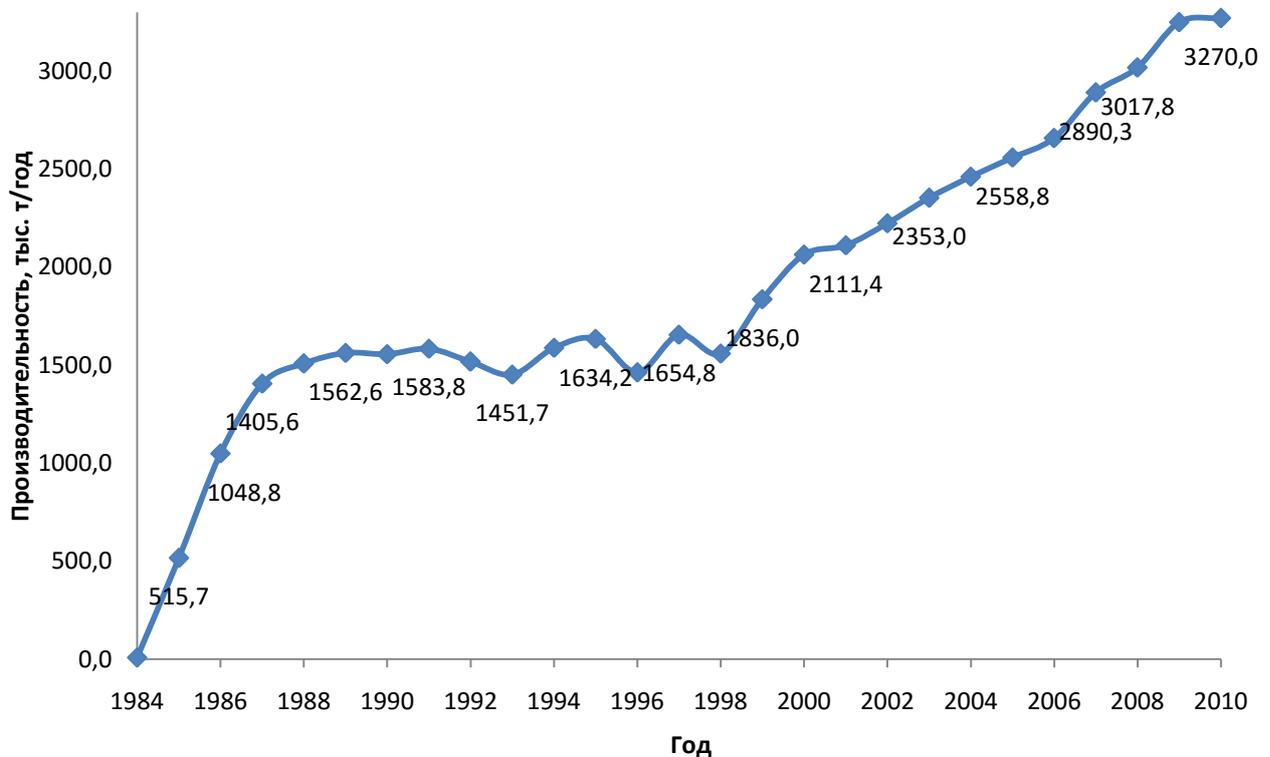


Рисунок 1.3 - Объемы производства ОАО «ОЭМК»

Таких высоких показателей производства удалось достичь за счет проведения следующих мероприятий:

- установка газокислородных модулей Пайерджет фирмы «American Combustion» (США), предназначенных для интенсификации плавки введением химической энергии. Одно из преимуществ технологии - возможность ведения технологического процесса с закрытым рабочим (шлаковым) окном практически весь период плавки, что позволяет поддерживать стабильный объем вспененного шлака и надежно укрывать электрическую дугу. В результате сократилась продолжительность плавки и увеличилась производительность каждой ДСП на 48 тыс. т стали в год, а также сократился удельный расход электроэнергии и печных электродов [31, 32];

- заменена на новые шести из восьми ленточных весовых дозаторов непрерывного действия для подачи МО и четырех ленточных весовых дозаторов для подачи извести [31, 32];

- установка системы регулирования и оптимизации мощности электрической дуги «SMARTARC» фирмы «AMI» (Мексика), которая управляет положением электродов, переключателем ступеней напряжения, устанавливает ток на электродах, выбирает скорость подачи извести и МО (с целью вывести плавку на заданную температуру выпуска), обеспечивая при этом оптимальную мощность электрической дуги в каждый момент времени [33] Внедрение этого мероприятия позволило увеличить производительность каждой печи на 25 тыс. тонн в год в результате сокращения длительности плавки, а также улучшить технико-экономические показатели за счет снижения удельного расхода электроэнергии и электродов [31, 32];

- переход на современные программируемые логические контроллеры «Симатик S-7» фирмы "Siemens" с возможностью управления скоростью подачи окатышей в печь в автоматическом режиме [31, 32];

- замена трансформаторов мощностью 90 на 105 МВ·А фирмы "TAMINI" (Италия) на ДСП № 2 и 3, благодаря этому уменьшилась длительность плавки и

увеличилось производство стали на 50 тыс. т в год на каждой печи [31, 32];

- переход на водоохлаждаемые своды и стеновые панели, что позволило сократить простои агрегатов [31, 32].

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

В настоящее время проблема снижения энергоемкости производства стали и повышение технико-экономических показателей работы ДСП малой вместимости является одной из актуальных задач стоящих перед отечественной металлургией. Повышение эффективности работы ДСП возможно за счет оптимизации энерготехнологического режима электроплавки стали и улучшения тепловой работы агрегата.

На ДСП подводимую к печи мощность регулируют путем переключения ступеней напряжения печного трансформатора. В период расплавления шихтовых материалов работают на максимальных ступенях напряжения трансформатора, в окислительный период – на средних и в восстановительный период – на низших, что позволяет обеспечить оптимальные значения подводимой мощности. Кроме этого, для всех ступеней напряжения при помощи автоматических регуляторов поддерживают наиболее оптимальную мощность электрических дуг и силу тока [33].

На рисунке 1.4 приведены электрические и технологические показатели работы ДСП [33].

Электродуговую печь с позиции электротехники можно представить набором реактивных X и активных R сопротивлений, которые подключены к печному трансформатору.

Основные электрические характеристики в ДСП: вводимая в печь активная мощность - $P_{акт}$; полезная мощность (мощность электрических дуг) - P_d ; сила рабочего тока электрической дуги I_d ; напряжение электрической дуги U_d ;

вторичное фазное напряжение трансформатора $U_{2\phi}$; электрический КПД η , коэффициент мощности λ (иногда не строго - $\cos\varphi$), связывает активную мощность, которую потребляет печь, и кажущуюся мощность печного трансформатора $S_{тр}$ [33, 34].

Рациональный электрический режим работы ДСП выбирают путем расчета рабочих и электрических характеристик ДСП в зависимости от силы тока электрической дуги I_d , электрических, тепловых и технико-экономических параметров ДСП. Основные формулы для расчёта рациональных электрических режимов представлены [35]:

$$\text{Мощность полная } S = 3U_{2\phi} I_d ; \quad (1.1)$$

$$\text{Реактивная мощность } Q = 3I_d^2 X ; \quad (1.2)$$

$$\text{Активная мощность } P_{акт} = \sqrt{S^2 - Q^2} ; \quad (1.3)$$

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi = \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d X)^2} / U_{2\phi} ; \quad (1.4)$$

$$\text{Мощность электрических потерь } P_{эн} = 3I_d^2 r_k \quad (1.5)$$

где r_k - сопротивление короткой сети, м;

$$\text{Мощность нагрева } P_n = P_{акт} - P_{эн} ; \quad (1.6)$$

$$\text{Электрический КПД } \eta_э = \frac{P_n}{P_{акт}} ; \quad (1.7)$$

$$\text{Полезная мощность } P_{пол} = P_n - P_{т.п} ; \quad (1.8)$$

$P_{т.п.}$ - мощность тепловых потерь.

$$\text{Общий КПД } \eta_o = \frac{P_{пол}}{P_{акт}} ; \quad (1.9)$$

$$\text{Мощность электрической дуги } P_d = I_d \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d X)^2} - I_d^2 r_k ; \quad (1.10)$$

$$\text{Напряжение на электрической дуге } U_{\dot{A}} = \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_{\dot{A}} \tilde{O})^2} - I_{\dot{A}} r_{\dot{e}} ; \quad (1.11)$$

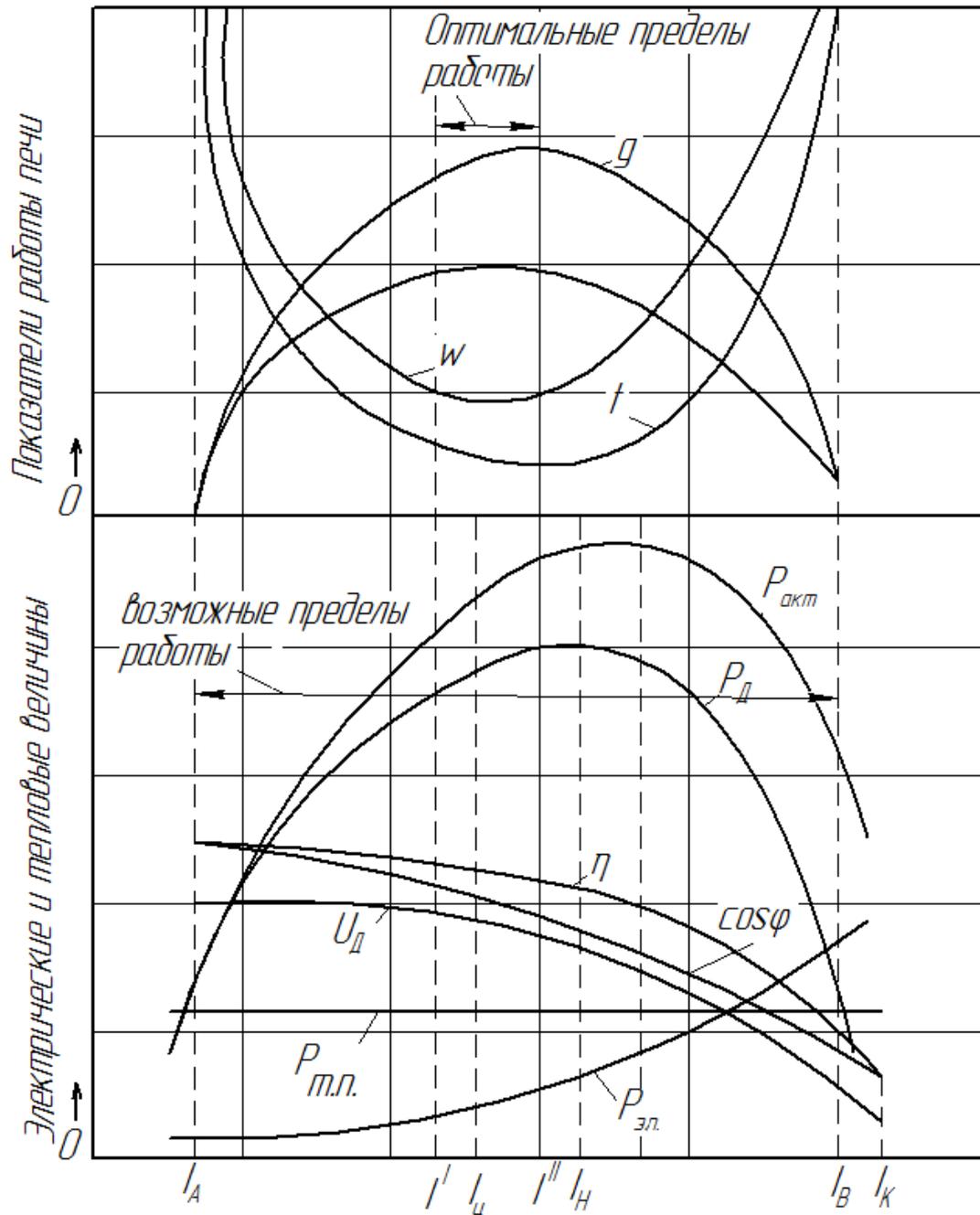


Рисунок 1.4 - Электрические и рабочие характеристики ДСП

Выбор режима, учитывая рабочие характеристики, осуществляют следующим образом. Оптимальный энергетический режим соответствует точке Г с минимальным удельным расходом электроэнергии w (Вт*ч/т) и максимальной производительностью g (т/ч), при котором достигается максимум полного коэффициента полезного действия печи. При наивысшей мощности ток I'' больше тока I' , выделяемой в ванне, вследствие роста электрического КПД. Одновременно минимальное время периода плавления шихты и максимальная

производительность достигаются при токе I'' . Исходя из этого, диапазоном токов $I' - I''$ определяется зона оптимальных токов. Критерием оптимизации осуществляется выбор рабочего тока внутри этого диапазона. Для сокращения расхода электроэнергии работу печи ведут при токе I' , для получения максимальной производительности работают на токе I'' . Между токами I' и I'' располагается режим с минимальной себестоимостью. Окончательно выбор режима производится переключением ступеней напряжения трансформатора, при изменении которых меняется длина дуги. Как правило, плавку начинают на максимальном вторичном напряжении трансформатора, которое снижают по ходу ведения плавки для компенсации падения градиента потенциала в столбе электрической дуги. Особенно важно максимально (на 30 – 40 %) снизить напряжение в период доплавления, когда открытые дуги интенсивно облучают свод печи и стены. При этом токи меняются слабо, что приводит к необходимости уменьшать длину дуги путем погружения её в металл. При этом из-за низкого напряжения рабочие режимы переходят на правую падающую часть характеристики $P_d = f(I_d)$, что приводит к росту расхода электроэнергии из-за снижения коэффициента мощности и электрического КПД. Поэтому на современных мощных ДСП работают на более длинных дугах, при более низкой силе тока, снижая излучение электрических дуг на футеровку печи путем наведения пенных шлаков.

При выборе электрического режима также можно применить эмпирические коэффициенты интенсивности нагрева КИН и износа футеровки R_f . Описывая связь электрического режима и воздействия электрических дуг на кирпичную футеровку печи W.E. Schwabe ввел коэффициент определяющий износ футеровки печи [36, 37].

$$R_f = \frac{3P_d U_d}{a^2} \quad (1.12)$$

где a - расстояние между осью столба дуги и ближайшей точкой футеровки, м.

Коэффициент R_f так же применим для определения характера влияния излучения электрической дуги в рабочем пространстве ДСП, поэтому его можно использовать как в период жидкой ванны, когда его максимальное значение определяет наибольшие тепловые потери и наихудшие условия работы футеровки, так и в период плавления твёрдой шихты, где R_f характеризует максимальную интенсивность нагрева и скорость расплавления металла, и как следствие, наиболее благоприятный режим в данный период. В период жидкой ванны с целью оптимизации режима используют коэффициент интенсивности нагрева металла $KИН = 3P_{дД}$, (МВт*кА), а при условии наличия большого слоя шлака, коэффициент использования электрической дуги КИД. Связь КИД и КИН со скоростью нагрева жидкой стали позволяет применять их как параметры оптимизации режимов в период жидкой ванны [38].

1.3 Возможность применения графитовых трубчатых электродов на дуговых сталеплавильных печах малой и средней вместимости

Несмотря на интенсификацию процесса выплавки стали в современных ДСП существуют резервы повышения энергоэффективности выплавки электростали.

Как показал анализ научно-технической литературы [33, 39, 40], одним из наиболее перспективных методов интенсификации электроплавки является применение графитированных трубчатых (полых) электродов.

Вопрос о возможности использования трубчатых электродов рассматривался давно, однако их практическое использование в промышленных ДСП находится на стадии исследований.

Е. А. Миляев в 1932 г. выступил с предложением применения угольных трубчатых электродов в печах с зависимой электрической дугой с целью осуществления процесса прямого получения железа из руды. Внутреннее отверстие в вертикальном электроде трубчатого сечения использовалось для

подачи угольного порошка², который является восстановителем железной руды, в рабочее пространство печи. Так же это отверстие можно было использовать для ввода в печь различных добавок в мелкоизмельченном или порошкообразном виде [33].

В дуговых печах трубчатые электроды рекомендовалось применять как устройство для ввода в печь шлакообразующих и шихтовых материалов; для замера температуры поверхности, горения электрической дуги в руднотермических печах; в сталеплавильных печах для выравнивания режима горения электрической дуги [33].

Исследования трубчатых электродов, с целью изучения их влияния на стабилизацию электрической дуги, были проведены в нескольких странах (США, ГДР, ЧССР, ПНР, СССР) в начале 50-х годов двадцатого века. Исследования были выполнены на печах емкостью 5 - 125 т. Основное внимание уделялось изучению электрического режима. Проведенные опыты с использованием трубчатых электродов выявили, что на столб электрической дуги отверстие в электроде оказывает фокусирующее действие [39].

Выполненные в США Джонсоном [33] опыты по изучению дугового разряда при помощи осциллографирования и киносъемки, показали, что при использовании графитированных электродов трубчатого сечения обрывы электрической дуги происходят гораздо реже и более коротки по времени в сравнении с электродами сплошного сечения (табл. 1.1).

Так же исследования Джонсона выявили, что использование трубчатых электродов приводит к увеличению расхода самих электродов. Так, при работе в течении 70 мин на сплошном графитированном электроде диаметром 355 мм его расход по длине составил 178 мм, а у трубчатого электрода того же сечения при диаметре отверстия $d_{омс} = 51мм$ за 60 мин расход по длине составил 190 мм

($\frac{d_{омс}}{D_{эл}} = 0,14$), при $d_{омс} = 75мм$ - на 203 мм ($\frac{d_{омс}}{D_{эл}} = 0,21$) и при $d_{омс} = 102мм$ - на 216

² Аксенов О.Ф. и др. Авт. свид.№2994297/22-02, (19) SU (II) 959431 кл. с 21 с 5/56. Оpubл. 15.10.1980г.

мм ($\frac{d_{омс}}{D_{эл}} = 0,29$). Характер влияния расхода ионизирующего газа на показатели стабильности электрической дуги приведены в таблице 1.2 [33].

Таблица 1.1 - Сравнительные данные влияния графитированных электродов трубчатого и сплошного сечения на режим горения электрической дуги в атмосфере воздуха [33]

Период расплавления твердой шихты, мин	Число обрывов электрической дуги	
	Сплошной электрод $D_{эл} = 355мм$	Трубчатый электрод $D_{эл} = 355мм$, диаметр отверстия $d_{омс} = 51мм$, $\frac{d_{омс}}{D_{эл}} = 0,14$
0-5	41	16
5-10	33	0
10-15	20	0

Из анализа данных, полученных на промышленных печах вместимостью 15, 63 и 125 т. можно сформулировать следующий вывод, что применение трубчатых электродов способствует более спокойному и устойчивому горению электрической дуги в печи.

Устойчивость электрической дуги рассматривается, как ее способность в любой отрезок времени сохранять электрическое сопротивление постоянным. На устойчивость горения электрической дуги при неизменном фазовом напряжении и токе дуги, влияют:

- подвергающейся ионизации, состав подэлектродной зоны;
- температура подэлектродного пространства;
- характер и состав изменения атмосферы в ДСП;
- состояние и форма торцов электрода.

Длину электрической дуги и ее электрическое сопротивление взаимодействие этих факторов [39].

Таблица 1.2 - Данные для сравнения работы 50-кг печи на электродах сплошного $D_{эл}=63,5$ мм и трубчатого сечения ($D_{эл}=63,5$, $d_{отв}=12,7$; $d_{отв}/D_{эл}=0,2$) с вводом в печь различных газов* [39]

Плавки	Количество плавков	Расход газа на один электрод, м ³ /мин	Время плавления $\tau_{пл}$		Расход энергии на расплавление шихты			Средняя мощность периода плавления		Температура плавления в конусе расплавления, °С	Скорость нагрева металла	
			мин	%	кВт*ч	кВт*ч/т	%	кВт	%		°С/мин	%
При работе на сплошных электродах	25	-	28,5	100	30,0	750	100	63,6	100	1525	53,6	100
С вводом аргона при работе на трубчатых электродах	14	0,014	22,3	78,2	26,1	653	87	70,3	110,5	1530	66,0	123,1
С вводом азота при работе на трубчатых электродах	7	0,028	27,2	95,5	30,4	760	100,1	67,3	106	1540	57,0	106,3
С вводом генераторного газа при работе на трубчатых электродах	6	0,028	34,6	122	35,0	875	116,8	61,6	97	1530	42,9	80
С вводом окиси углерода при работе на трубчатых электродах	6	0,028	31,5	111	34,2	855	114	65,0	86,5	1525	46,9	87,5
С вводом водорода при работе на трубчатых электродах	6	0,028	41,7	146	35,3	884	117,9	51,1	80,5	1515	34,6	64,5

*90 кВт - мощность печи, 80-140 В - вторичное напряжение

Также можно сказать, что улучшается стабильность таких параметров энергосистемы как напряжение сети, $\cos\phi$, резко снижается количество токовых толчков в период расплавления (рис. 1.5); электрическая дуга фокусируется на кромке отверстия электрода трубчатого сечения вследствие наиболее благоприятных условий ионизации, занимает наиболее вертикальное положение и становится массивней (рис. 1.6); при использовании электродов трубчатого сечения мощность электрической дуги используется эффективнее, особенно этот эффект наблюдается в период расплавления шихты. Так же можно отметить увеличение использования мощности в периоды беспокойного электрического режима с 84-85 до 93-94 % и возможность снижения расхода электроэнергии до 15 % [39]. Так, коэффициент полезного действия электрической дуги в период расплавления для печи емкостью 15-тонн, при работе на электроде сплошного сечения составил 0,83 - 0,85, а при работе на электроде трубчатого сечения он возрос до 0,90 - 0,93 (рис. 1.7).

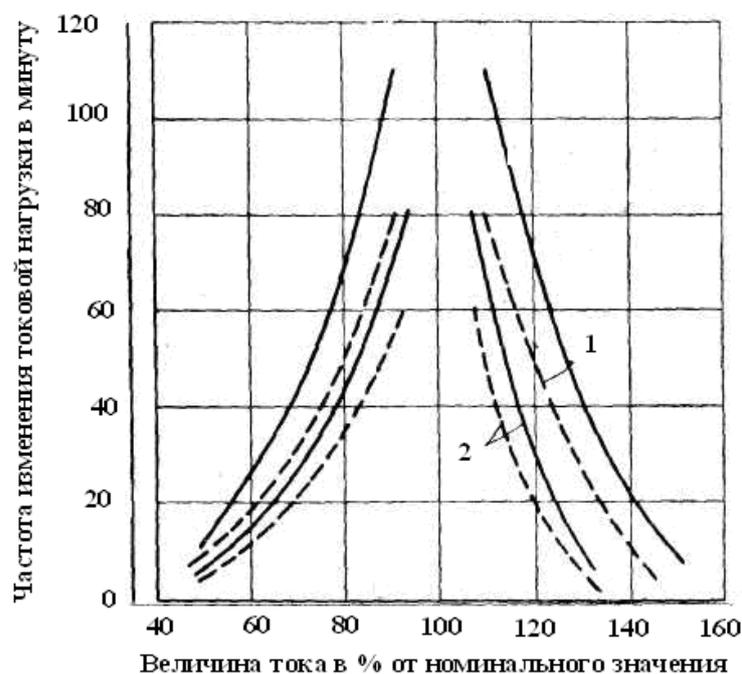


Рисунок 1.5 - Влияние электродов трубчатого сечения на стабилизацию токовой нагрузки. 1 – для 63т печи ($U_{2\phi} = 355B$, $I_{ном} = 35000$ А); 2 – для 126 т. печи ($U_{2\phi} = 475B$, $I_{ном} = 45500$ А); ——— - электроды сплошного сечения; — — — — - электроды трубчатого сечения [39]

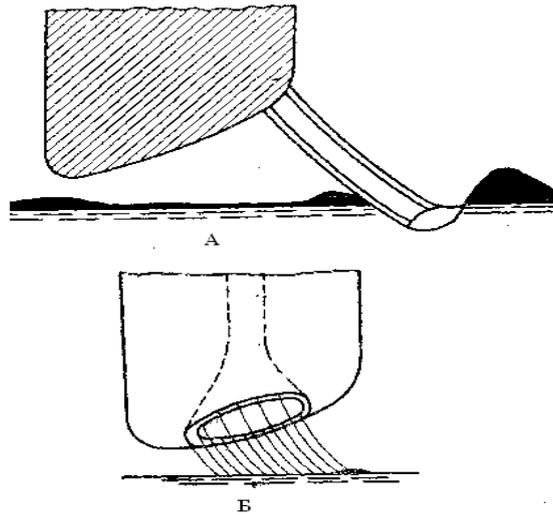


Рисунок 1.6 - Горение электрической дуги при работе на сплошном (А) и трубчатом электроде [39]

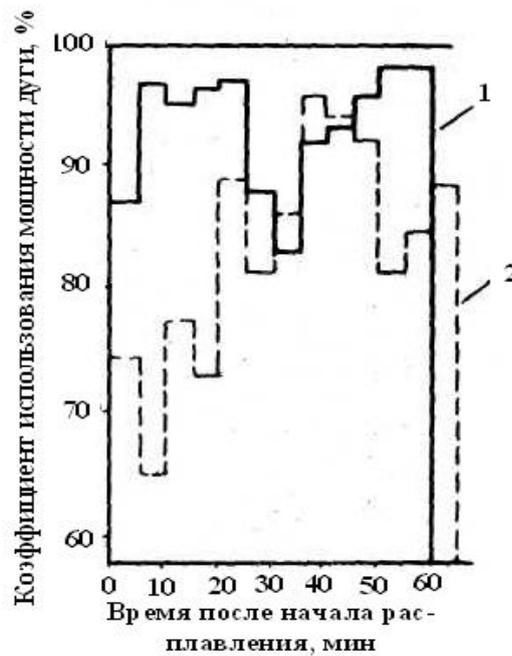


Рисунок 1.7 - Зависимость коэффициента использования мощности электрической дуги от времени после начала расплавления при работе ДСП вместимостью 15 т. 1 – электроды трубчатого сечения; 2 – электроды сплошного сечения [33]

Так же, вследствие того, что мощность электрической дуги увеличивается длительность периода плавления сокращается и достигается снижение удельного расхода электроэнергии в среднем на 3 – 5 %; использование трубчатых

электродов, в некоторых случаях, способствует повышению стойкости футеровки стен на 12 % и свода на 9 % [39], что можно объяснить меньшей величиной выдувания электрических дуг из-под торца электродов. Однако в обозначенных выше работах было отмечено, что при использовании трубчатых электродов увеличивается их удельный расход. Например, перерасход для печи вместимостью 15 т. колебался от 2 до 10 %, включая расход электродов на выгорание в зоне электрической дуги, окисление и поломку. Исследования трубчатых электродов, выполненные на 15-тонной ДСП в Польше и в 5, 10-тонных ДСП в ГДР, подтвердили выводы, сделанные в результате работы печей в США. Этот недостаток возможно устранить. Так, на печах завода «Днепроспецсталь» в 1958 г. [40] была испытана партия пустотелых электродов, изготовленных методом сверления, где при $D_{эл} = 450$ мм отношение $d_{отв}/D_{эл} = 0,45$. В результате испытаний установили, что в сравнении с работой на электродах сплошного сечения угол отклонения столба электрической дуги от оси электрода снижается, сокращается на 1 % расход электроэнергии, повышается $\cos\phi$ с 0,904 до 0,927 в окислительный период. При этом было установлено, что поломки электродов образовывались в первую очередь из-за возникающих продольных трещин, что объясняется, с одной стороны, низким качеством электродов, а с другой – слишком большим диаметром отверстия. Основываясь на обобщенных данных (таб. 1.3) по применению трубчатых электродов на промышленных дуговых печах можно сделать вывод что, электроды трубчатого сечения могут эффективно использоваться не только на руднотермических, но и на дуговых печах. Ряд авторов [40, 41] отмечают увеличение удельного расхода электродов, из-за эрозии внутренней поверхности в результате контакта с окислительной атмосферой в рабочем пространстве печи. Однако, путем введения [42, 43] через отверстия трубчатых электродов потока инертных газов аргона или азота с одновременной подачей через эти отверстия шлакообразующих и металлизированных окатышей [33], этот минус можно устранить.

Таблица 1.3 - Данные, промышленных испытаний при работе ДСП на сплошных электродах (числитель) и на трубчатых электродах (знаменатель)

Емкость печи, т	Диаметр электрода $D_{эл}$, мм	Диаметр отверстия электрода $d_{отв}$, мм	$D_{отв}/D_{эл}$	Частота изменения тока		Мощность в период расплавления		Производительность в период плавления		Удельный расход электроэнергии		Стойкость футеровки				Расход электродов	
				Импульс, мин	%*	кВт	%*	Т/ч	%*	кВт*ч/т	%*	Стен		Свода		кг/т	%*
												плавков	%*	плавков	%*		
5	300	45	0,15	-	-	-	-	-	-	-	(3-5)	49/52	+6,1	24/23	-4,2	-	+(2-10)
10	350	65	0,185	-	-	-	-	-	-	-	(3-5)	48/52	+8,3	32/48	+50	-	+(2-10)
15	350	50	0,14	-	-50	-	+(13-17)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	355	51	0,14	10,9/3,5	-68	4360/4790	+9,8	14/16	+14,3	350/333	-6,2	-	-	-	-	-	+(2-10)
15	355	76	0,21	10,9/3,5	-68	4360/4830	+10,7	14/16	+14,3	355/335	-5,6	-	-	-	-	-	+(2-10)
15	355	100	0,28	10,9/3,5	-68	4360/4860	11,5	14/16	+14,3	355/338	-4,7	-	-	-	-	-	+(2-10)
28	400	80	0,20	-	-(20-30)	-	-	-	-	708/718	+1,4	-	-	85/95	+8,2	6,1/6,51	+6,7
63	-	-	-	16,4/6,3	-61,5	-	-	45/49	+8,9	-	-	-	-	-	-	-	-
63	500	25	0,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**	-	**	-	-
125	600	-	-	7,4/3,5	52,7	-	-	50/53	+6,0	-	-	-	-	-	-	-	-

• В % дано изменение показателей печи при ее работе на электродах трубчатого сечения по сравнению с показателями работы на электродах сплошного сечения (+увеличение, -уменьшение).

• Сокращение расхода огнеупорных материалов на свод составило 9% и на стены 12% при работе на электродах трубчатого сечения по сравнению с работой на электродах сплошного сечения.

Таким образом, использование трубчатых электродов (в печах постоянного и переменного токов) новым техническим приёмом не является, однако, не изучено в достаточном объеме. Большая часть исследований по изучению влияния трубчатых электродов на работу дуговых печей были выполнены более 40 лет назад на ДСП средней и малой емкости (до 125 т), а автоматизированные системы регулирования в последние два десятилетия вышли на совершенно новый уровень по сравнению с серединой 20-го века. Поэтому основываться на выполненные в то время исследования можно только в качественном отношении.

Приведенные выше данные, показывают возможность увеличения технических показателей ДСП, однако, исследования в этом направлении очень мало [39].

1.4 Выводы по главе 1

Анализ научно-технической литературы по вопросам развития отечественной и мировой металлургии показал, что объемы выплавки стали в ДСП имеет тенденции к увеличению. При этом развитие электрометаллургии идет в направлении сокращения длительности плавки, уменьшения удельного расхода электроэнергии и повышения других технико-экономических показателей ДСП. Одним из направлений совершенствования энергетических режимов работы ДСП является замена сплошных электродов на трубчатые.

Впервые о возможности применения трубчатых электродов было сказано в 1932 году профессором Е.А. Миляевым. В начале 50-х годов были проведены первые испытания применения трубчатых электродов в ДСП. Несмотря на то, что использование трубчатых электродов не является новым техническим приемом, однако оно слабо исследовано. Большинство исследований были выполнены в середине 20-го века, и опираться на них будет не совсем корректно, так как уровень производства графитовых электродов и внедрение современных систем автоматического регулирования вышли на принципиально новый уровень. В

связи с этим необходимо провести ряд исследований по изучению энергетических режимов работы современных ДСП на трубчатых электродах.

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

2.1 Общие характеристики электрической дуги как основного источника тепловой энергии в дуговой сталеплавильной печи

В ДСП основным источником энергии являются электрические дуги, горящие в рабочем пространстве между графитовыми электродами и металлом, в них концентрируется огромная энергетическая мощность. Поэтому, повышение эффективности использования этой энергии по ходу электроплавки позволит интенсифицировать связанные между собой физико-химические, теплоэнергетические и, частично, плазменные процессы, протекающие в рабочем пространстве ДСП.

Создание и поддержание рационального энерготехнологического режима при выплавке стали в ДСП является одной из важных технологических задач современной электрометаллургии.

Для обеспечения рационального энерготехнологического режима электроплавки стали необходимо осуществлять управление выделяемой в электрической дуге тепловой мощностью. Это возможно сделать двумя способами:

- 1) путем изменения напряжения, подаваемого на электрод, то есть переключением ступеней напряжения печного трансформатора;
- 2) при выбранной ступени напряжения, путем изменения длины электрической дуги или величины рабочего тока электрической дуги, то есть при помощи перемещения электрода.

В определенные моменты плавки стали изменение вторичного напряжения печного трансформатора с помощью переключения ступеней напряжения может

осуществляться дискретно и директивно.

На основании вышеизложенного можно сказать, что в зависимости от периода плавки, технологический режим выплавки стали в ДСП оказывает сильное воздействие на энергетический режим работы печи.

Электрический режим в каждой фазе питающего напряжения выбирают автономно в зависимости от существующих условий плавки стали для выбранной ступени напряжения трансформатора [44, 45, 20].

Электродуговой разряд (основной источник тепловой энергии) можно разделить на три характерные области, которые значительно различаются по протеканию в них процессов. Так, дуговой разряд состоит из газовой среды, по которой протекает ток (разрядного промежутка) и ограничивающих поверхностей. Ограничивающими поверхностями основания разрядного промежутка являются электроды - катод у отрицательного основания и анод у положительного. Катодное и анодное пятно располагаются в центре анодной и катодной части. «Ореол» (раскаленные газы) не принимающий участия в прохождении электрического тока представляет собой боковую поверхность разрядного промежутка [37, 46]. Рассмотрим основные энергетические и электрические характеристики электрической дуги. Распределение подводимого напряжения к электроду каждой фазы по длине электрической дуги изображено на рисунке 2.1.

В анодной U_A (прилегающей к аноду) и катодной U_K (прилегающей к катоду) областях, при их малых размерах, падение напряжений достигает значительных величин.

Границы катодной области соизмеримы с несколькими длинами свободных пробегов ионов, а границы анодной области соизмеримы с длиной свободных пробегов электронов. Следовательно, при работе на переменном токе положение областей изменяется с частотой 50 Гц.

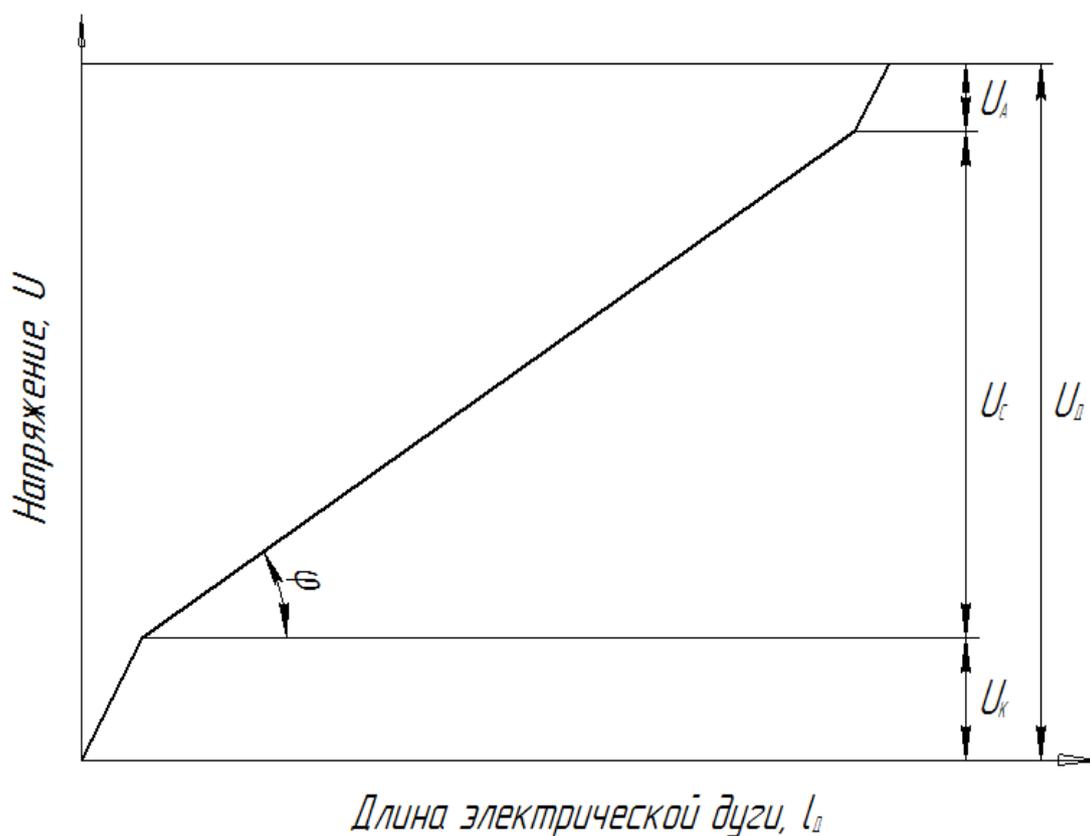


Рисунок 2.1 - Зависимость падения напряжения от длины электрической дуги фазы [44]

Общее напряжение электрической дуги U_D определяется как сумма падений напряжений:

$$U_D = U_k + U_c + U_a \quad (2.1)$$

где U_c - напряжение столба электрической дуги, м.

Так как размеры столба электрической дуги существенно больше размеров анодной и катодной областей, то общее напряжение электрической дуги U_D можно представить в виде:

$$U_D = U_k + U_a + tg\phi l_D \quad (2.2)$$

где l_D - длина столба электрической дуги, м; $tg\phi$ - градиент потенциала в столбе электрической дуги.

Несколькими авторами экспериментальным путем подтверждено [47, 20], что напряжение электрической дуги имеет линейную зависимость от длины электрической дуги, в соответствии с (2.2) это говорит о том, что имея постоянную длину электрической дуги и различный ток, сопротивление

электрической дуги R_D (Ом) будет изменяться обратно пропорционально изменению тока электрической дуги:

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (2.3)$$

То есть, сопротивление электрической дуги, а значит и сила тока электрической дуги, при установленном напряжении питания фазы будет зависеть от длины электрической дуги.

Явление, описанное выше, качественно представлено в работах [48, 49] следующим образом. С возрастанием силы тока (I_D) наблюдается увеличение поперечного сечения электрической дуги (S_D):

$$S_D = KI_D \quad (2.4)$$

где K – коэффициент пропорциональности, $\text{см}^2/\text{А}$.

Тогда:

$$R_D = \frac{l_D}{\beta S_D} = \frac{l_D}{\beta KI_D} \quad (2.5)$$

где β – электрическая проводимость электрической дуги, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [37];

Напряжение на электрической дуге U_D равно:

$$U_D = R_D I_D = \frac{l_D}{\beta K} = \text{const} \quad (2.6)$$

Исходя из вышеизложенного, "статистическая" вольтамперная характеристика электрической дуги $U_D = f(I_D)$ представляет собой горизонтальную линию. С.И. Тельный и И.Т. Жердев в своих экспериментах с мощной электрической дугой горячей в сталеплавильных печах впервые подтвердили экспериментально такую вольтамперную характеристику [48, 49].

Падение напряжения в приэлектродных областях электрической дуги колеблется в пределах от 9 до 30 В по ходу плавки и зависит от материала электрода [20, 47].

Значение градиента $\text{tg}\varphi$ в выражении (2.2) значительно изменяется по ходу электроплавки стали: в период расплавления металлической шихты она

составляет 10-12 В/мм; в окислительный период она составляет 1,5-3,8 В/мм; в восстановительный период ее значения составляет 0,7-1,1 В/мм [20, 47].

Все это говорит о том, что в процессе плавки стали в ДСП необходима динамическая коррекция программного режима энергопотребления.

В зависимости от электрических параметров длина электрической дуги может быть посчитана из уравнения для напряжения фазы печи U_ϕ :

$$U_\phi = \sqrt{(U_D + I_D R)^2 + (I_D X)^2} \quad (2.7)$$

Тогда напряжение электрической дуги из (2.7) можно определить в соответствии с выражением:

$$U_D = \sqrt{U_\phi^2 - (I_D X)^2} - I_D R \quad (2.8)$$

С учетом (2.2) и (2.5) получаем:

$$U_K + U_A + tg\varphi l_D = \sqrt{U_\phi^2 - (I_D X)^2} - I_D R \quad (2.9)$$

Тогда из (2.9) можно получить искомое выражение:

$$l_D = \frac{1}{tg\varphi} \left(\sqrt{U_\phi^2 - (I_D X)^2} - I_D R - (U_K + U_A) \right) \quad (2.10)$$

Выражение (2.10) является основополагающей зависимостью, определяющей стратегию технологически обоснованной коррекции директивно заданного энерготехнологического режима ДСП при интенсификации процесса плавления металлошихты и нагрева металлической ванны по ходу выплавки стали в дуговой печи.

Непрерывное изменение размеров, формы, лучистых параметров являются важной особенностью электрических дуг, горящих в дуговой печи трехфазного тока. В начале периода плавления металлической шихты электрическая дуга горит в атмосфере печи в колодце, образованном теплоемким металлом с высокой теплопроводностью. Потенциал ионизации газов, в котором горит электрическая дуга, достаточно высок: градиент напряжения на электрической дуге 10 - 12 В/мм. Длина электрической дуги на этом этапе плавки составляет 30-50 мм, что

определяет высокую объемную плотность выделяемой энергии [48, 50]. Выполненные Ю.Е. Ефроймовичем исследования [48, 51], показали, что осциллограммы силы тока и напряжения электрической дуги в этот период имеют существенные различия от теоретических.

Градиент потенциала электрической дуги снижается с достижением электродом жидкой стали на подине (металл покрыт слоем шлака), т.к. потенциал ионизации хрома, углерода, железа выше, чем у кальция. При этом происходит увеличение длины электрической дуги в 3-4 раза, температура дуги снижается, в печном газе в незначительной степени уменьшается концентрация пыли [44, 48]. Осциллограмма напряжения электрической дуги, приближаясь по форме к синусоиде, становится плавной.

В электрических дугах температурой столба электрической дуги связана со степенью ионизации в соответствии с уравнением Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2}P = 3,6 * 10^{-2} * T^{2,5} e^{\frac{11600 U_i}{T}} \quad (2.11)$$

где P - давление, Па; x - степень ионизации; T - температура, К; U_i – потенциал ионизации газа, в котором горит электрическая дуга, В.

Для установившейся степени ионизации уравнение записывается в следующем виде [44, 48]:

$$\frac{x^2}{1-x^2} P \sqrt[3]{e^{11600 U_i}} = 3,6 * 10^{-2} * T^{2,5} \quad (2.12)$$

Формула (2.12) определяет линейный характер зависимости потенциала ионизации от температуры. При условии черного излучения согласно теории Энгеля и Штембека температуру электрической дуги можно определить в соответствии с выражением [48, 49]:

$$T_c = 800 U_i \quad (2.13)$$

Электрическая проводимость электрической дуги главным образом зависит от физических свойств окружающей среды и условий ее охлаждения.

В электрической дуге горящей стабильно создается тепловое равновесие, характеризующееся тем, что количество тепла, отдаваемого электрической дугой

в окружающую среду равно количеству выделяющегося тепла. В связи с чем, при изменении физических свойств среды или условий охлаждения электрической дуги изменяются параметры дуги.

При возрастании степени охлаждения электрической дуги (увеличении плотности, теплоемкости и понижении температуры охлаждающей среды) для создания условий стабильной теплоотдачи необходимо уменьшать теплоотдающую поверхность электрической дуги за счет уменьшения ее длины при данном напряжении [48]. Это позволит увеличить напряженность электрического поля в электрической дуге при уменьшении ее диаметра и увеличении плотности электрического тока.

При протекании электрического тока через дуговой разряд создается электромагнитное поле, которое направлено по касательной к окружности, центром которой является ось электрода. При взаимодействии этого магнитного поля с током столба электрической дуги возникает электромагнитная сила F_l (Н) направленная снаружи внутрь столба электрической дуги к его оси. Силу F_l препятствующую отклонению столба электрической дуги от оси электрода, обычно называют восстанавливающей силой.

Сила, действующая на единицу наружной поверхности электрической дуги (давление сжатия) в точке с радиусом R_x (м), определяется по уравнению:

$$f_1 = \mu_0 \frac{I_D^2}{4\pi r_D} \left(1 - \frac{R_x^2}{r_D^2} \right) \quad (2.14)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость в вакууме, Г/м; r_D - радиус электрической дуги, м.

Из выражения (2.14) следует, что длина столба электрической дуги не влияет на давление сжатия f_1 характеризующее восстанавливающую силу F_l . Восстанавливающая сила F_l на оси столба электрической дуги имеет максимальное значение, с удалением от оси электрода убывает по параболическому закону и на поверхности столба электрической дуги равна нулю [48, 49, 52, 53].

Давление на элементы столба электрической дуги создаваемое восстанавливающей силой, передается по всем направлениям. За счет эффекта сжатия, создается осевое усилие, которое образует углубление в жидком расплаве, отбрасывая шлак и металл в ДСП в сторону. Действующая на поверхность расплава сила F_p (Н), определяется путем интегрирования выражения распределения силы по сечению электрической дуги, но большая часть авторов [48, 49, 52, 53] используют следующее уравнение:

$$F_p = 5 \cdot 10^{-8} I_D^2 \quad (2.15)$$

В месте соприкосновения электрической дуги с ванной образуется мениск. Опираясь на выражение (2.15) можно сказать, что электромагнитная сила пропорциональна квадрату силы тока электрической дуги, поэтому электрические дуги ДСП образуют в жидкой стальной ванне значительное углубление. За счет этого электрическая дуга экранируется металлом и шлаком, что приводит к снижению степени излучения электрической дуги на футеровку стен и свода печи, а так же увеличивается передача тепла ванне металла.

Современное представление о процессе образования мениска в жидкометаллической ванне основывается на том, что давление создаваемое электрической дугой вытесняет металл до создания условий равновесия в системе «дуга-ванна», которое определяется равенством следующих величин: силы реактивного давления электрической дуги F_D (Н), силы поверхностного натяжения $F_{пн}$ (Н), силы внутреннего трения $F_{вт}$ (Н) и гидростатического давления расплава. Если пренебречь силой внутреннего трения на всех бесконечно малых площадках поверхности ванны, то глубину мениска H_m (м), можно рассчитать по следующей формуле [48]:

Тогда глубина мениска

$$H_m = \frac{(F_D - F_{пн})}{\rho_m}, \quad (2.16)$$

где ρ_m - плотность жидкого металла, кг/м³.

Из уравнения (2.16) видно, что глубина мениска увеличивается с

возрастанием реактивного давления электрической дуги и со снижением величины плотности металла и сил поверхностного натяжения. Оценить форму мениска на практике, визуально или при помощи фото и видео аппаратуры не представляется возможным. Многие авторы, в том числе [54, 55], предполагают, что наиболее вероятной формой мениска в месте контакта электрической дуги с жидкометаллической ванной является шаровой сегмент [48].

Впервые В.Е. Пирожниковым и Ю.Е. Ефроймовичем, на печи вместимостью 20 т, было экспериментально изучено влияние электрического режима на величину глубины погружения электрической дуги в расплав. В результате исследования было выявлено, что при значении электрического тока 45 кА глубина погружения дуги в расплав превысила 60 мм [48].

В.Е. Пирожниковым был предложен подход для нахождения глубины мениска [48, 55]. Следующим уравнением определяется давление на дно мениска:

$$F_m = F_g + F_a \quad (2.17)$$

F_m - гидростатическое давление столба мениска и шлака (Па); F_g - электромагнитное давление электрической дуги на ванну (Па); F_a - аэродинамическое давление газов и паров, которое зависит от состава шлака и расплава, а так же мощности электрической дуги [48].

Глубина мениска H_m (м), которая включает в себя глубину мениска в металле h_m (м) и высоту шлака $h_{ш}$ (м), может определяться выражением:

$$H_m = 5,0 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{I_D^2}{S_B} \rho_M g_0 + \frac{P_a}{\rho_M g_0} \quad (2.18)$$

где S_B - сечение пятна электрической дуги на поверхности расплава, м²; g_0 - ускорение свободного падения, м/с² [48].

Р.И. Спелицин провел исследования на дуговых печах высокой мощности металлоемкостью 200 т. и 100 т. по определению положения торцов электродов относительно уровня расплава при различных электрических параметрах в период доплавания шихты [48, 56]. На сверхмощных ДСП переменного тока при определенных электрических параметрах электродинамическое давление

создаваемое электрической дугой на ванну может достигнуть таких величин, при которых величина шарового сегмента образуемого в металле превысит длину электрической дуги, другими словами рабочий торец электрода будет находится ниже уровня жидкометаллической ванны, а дуга полностью заглублена в металл. Вырывающаяся из-под электрода раскаленная масса газов, а также электромагнитная сила F_p препятствуют соприкосновению боковой поверхности электрода с ванной металла. Основываясь на этом, профессор А.Н. Макаров установил, что лежащий в основании шарового сегмента диаметр круга, превышает диаметр электрода на величину $2l_D \sin \varphi$ [48].

Площадь данного круга выделяет значительную мощность электрической дуги. В подэлектродной зоне поверхность металла имеет температуру, значительно превосходящую температуру остальной поверхности расплава, которая называется горячей зоной ванны металла [48].

Лежащий в основании шарового сегмента радиус круга r_k (м), определяется из [48, 50]:

$$r_k = r_э + l_D \sin \varphi \quad (2.19)$$

где $r_э$ - радиус электрода, м; φ - угол отклонения столба электрической дуги от оси электрода, рад.

Радиус шаровой поверхности сегмента r_c (м) определяется:

$$r_c = r_э + l_D \quad (2.20)$$

Электродинамические воздействия способствуют выплеску шлака из-под электрода, толщина шлака при этом не влияет на величину заглубления электрической дуги в расплав, а отсчет заглубления выполняется от уровня металла, а не от уровня шлака. На печах емкостью 100 и 200 тонн выполнены исследования по изучению заглубления электрических дуг, в результате которых получены экспериментальные данные [48, 56], которые показали, что величина заглубления электрических дуг на данных печах составляет 3 мм/кА, а также выведена формула для определения высоты заглубления [48]:

$$h_m = 3 \cdot 10^{-3} l_D \quad (2.21)$$

2.2 Основные положения теории выдувания электрической дуги

Известно, что столб электрической дуги представляет собой подвижный, легко деформируемый под воздействием магнитных полей проводник. Образующееся вокруг столба электрической дуги магнитное поле создает сжимающий эффект. Этот эффект объясняется тем, что при прохождении тока в столбе электрической дуги возникают радиальные сжимающие усилия, направленные от поверхности к оси. Возникающее при этом давление распространяется в газовой среде электрической дуги по всем сторонам, в том числе и на металл. Если электрическая дуга представляет собой форму усеченного конуса, то величина давления на металл будет дополнительно возрастать за счет возникновения результирующей силы, направленной от меньшего сечения к большему. Это объясняется тем, что сжимающий эффект при прохождении электрического тока в столбе электрической дуги в малом сечении будет больше, чем в большом сечении конуса. Величина этой результирующей силы может быть подсчитана по формуле [37]:

$$F_{д} = 5 \cdot 10^{-8} I_{д} \ln R_1 / R_2 \quad (2.22)$$

где R_1 , R_2 - радиус большого и малого сечения конуса, м.

Лабораторные исследования электрических дуг показали [48], что на направление электрической дуги в первую очередь влияет ток, протекающий в расплаве металла и геометрия конца электрода, а не магнитное отталкивание. Протекающий по жидкой ванне печи ток, создает электромагнитное поле, направленное по касательной к окружности, центром которой является электрическая ось токопроводящего поверхностного слоя жидкой стали. Это поле является поперечным по отношению к столбу электрической дуги, взаимодействие его с электрическим током дуги образует электромагнитную силу, которая направлена в сторону футерованных стен по линии, где стена печи и электрод находятся друг от друга на минимальном расстоянии [41, 57]. В меньшей степени на выдувание электрических дуг из-под электродов

воздействуют токи, протекающие в различных фазах. И, наконец, электрическая дуга может отклоняться в сторону, где располагаются большие массы ферромагнитных материалов. В значительной мере рассматриваемый наклон электрической дуги обусловлен также аэродинамическими действиями паров и газов, выдувающих электрическую дугу из относительно узкой щели, в которой она горит [37, 46].

Электромагнитная сила F_2 (Н), отклоняющая столб электрической дуги, может приближенно быть посчитана в соответствии с выражением [48, 57]:

$$F_2 = \mu I_D^2 \frac{l_D}{4\pi h_{эл}} \quad (2.23)$$

где μ - магнитная проницаемость плазмы электрической дуги; $h_{эл}$ - расстояние от электрической оси токопроводящего слоя, м. Согласно данным А.В. Егорова, электрическая ось токопроводящего слоя располагается на глубине 3,2 - 3,6 см от поверхности расплава [48, 58].

У поверхности металла электромагнитная сила F_2 достигает максимальных значений и снижается прямо пропорционально величине расстояния от него [49].

Как показывает практика, что отклоняющая сила F_2 может быть уравновешена восстанавливающей силой F_1 в коротких электрических дугах восстановительного периода плавки, и электрическая дуга горит соосно с электродом. Длина электрической дуги достигает максимальных величин в период завершения плавления шихты, максимума достигает и отклоняющая сила F_2 , которая больше восстанавливающей F_1 [48].

Как показывает анализ научно-технической литературы [37, 59] в трех-фазных ДСП переменного тока, где электроды расположены по вершинам равностороннего треугольника, при выдувании электрической дуги в сторону футеровки её ось может наклоняться по отношению к горизонту на 30 - 40°.

Аналогичное явление наблюдается и на ДСП постоянного тока. Так, электрическая дуга постоянного тока приобретает блуждающие изменяющиеся формы в пределах конуса с углом 30° от вершины электрода по направлению к

плавке. На рисунке 2.2 показаны некоторые типичные формы электрической дуги постоянного тока [59, 60].

На корректировку отклонения электрической дуги постоянного тока наибольшее влияние оказывает конструкция анода. В крупнотоннажных электропечах с подводом большой мощности электрическая дуга отклоняется в сторону, противоположную подводу мощности в результате несимметричности магнитного поля. В таких случаях получаются горячие пятна, которые вызывают усиленный износ огнеупоров. Это может быть предотвращено специальным проектированием линий токоподвода или выполнением расщепленного токоподвода с различной настройкой тока в обеих линиях токоподвода [59].

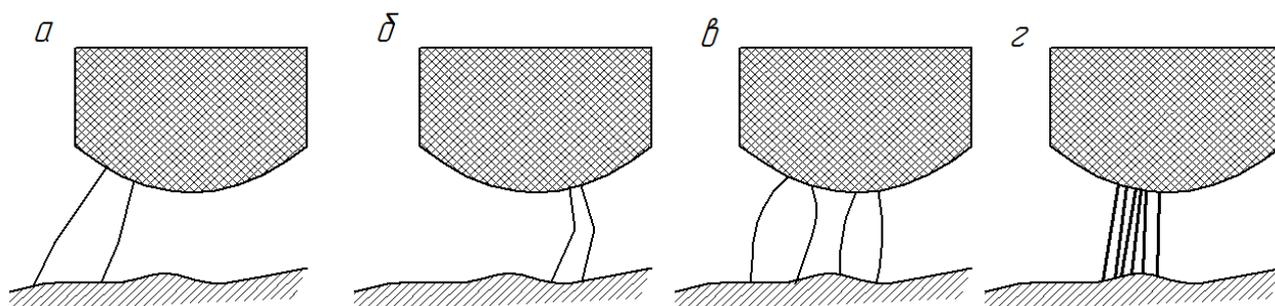


Рисунок 2.2 - Типичные формы электрических дуг постоянного тока:
а) прямая; б) скрученная; в) многоструйная; г) рассеянная

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что для повышения эффективности работы современных ДСП необходимо обеспечить минимальное отклонение электрической дуги от оси электрода. Одним из направлений снижения степени выдувания электрической дуги из-под электрода является применение трубчатых электродов. Проведенный обзор научно-технической литературы по вопросам изучения трубчатых электродов показал, что нет достаточных систематизированных данных о влиянии диаметра отверстия в трубчатом электроде на угол отклонения электрической дуги, поэтому для дальнейшего изучения влияния трубчатых электродов на эффективность тепловой работы дуговой сталеплавильной печи такое исследование необходимо провести.

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

Как показывает анализ научно-технической литературы [33, 37, 39, 40], применение трубчатых электродов позволяет снизить величину угла отклонения электрической дуги от оси электрода. Однако данный вопрос требует дальнейшего изучения, так как нет достаточных данных о влиянии величины диаметра отверстия в трубчатом электроде на степень отклонения электрической дуги от оси электрода. В связи с этим были выполнены лабораторные исследования на электропечной установке, представленной на рисунке 2.3.

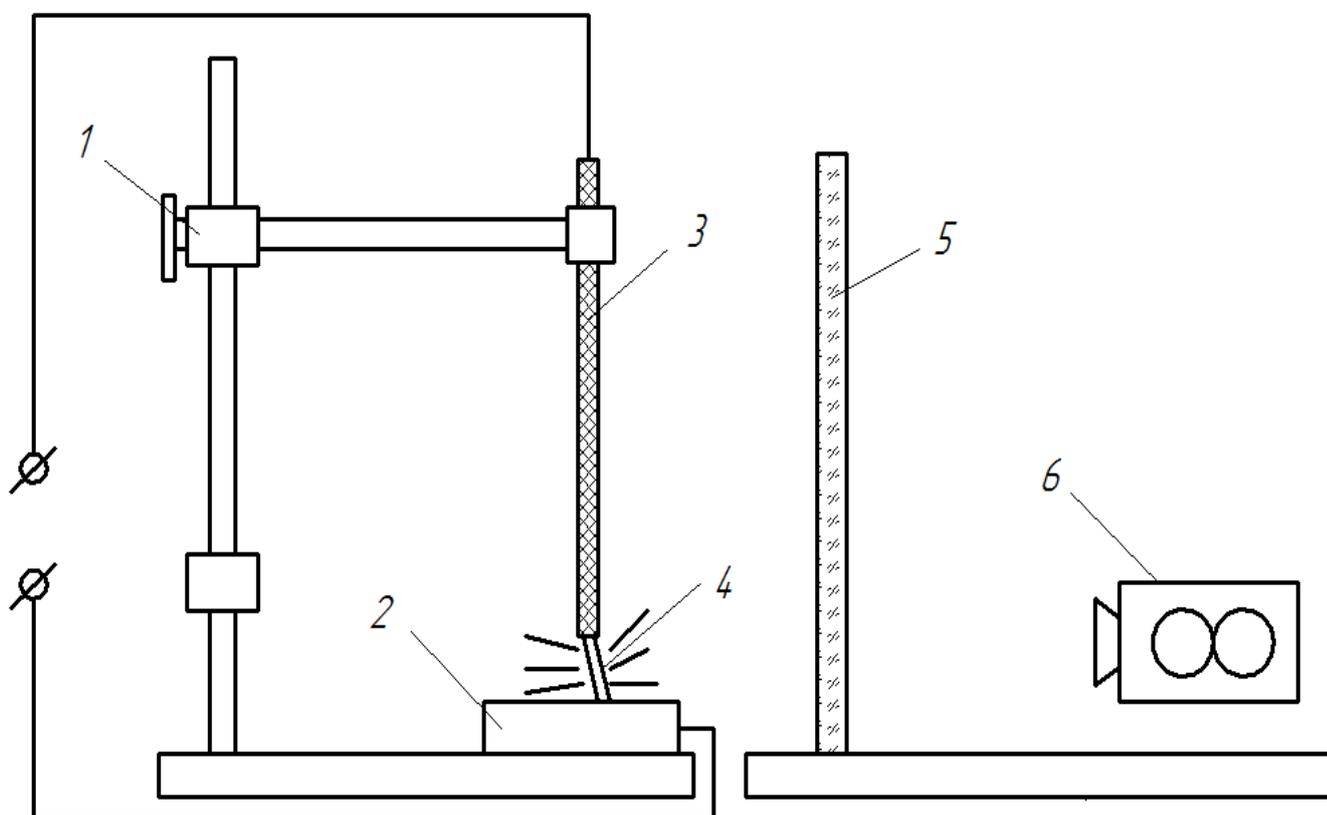


Рисунок 2.3 - Схема экспериментальной лабораторной установки для изучения угла отклонения электрической дуги: 1 - механизм перемещения электрода; 2 - графитовая пластина; 3 - графитированный электрод; 4 - электрическая дуга; 5 - защитный экран; 6 - видеокамера

В ходе выполнения исследований использовались графитированные электроды двух типов: сплошные и трубчатые электроды с наружным диаметром $D_{эл} = 35$ мм. Диаметр отверстий в трубчатом электроде варьировался в зависимости от отношений $d_{отв}/D_{эл}$ от 0,05 до 0,5. Электропитание установки осуществлялось от источника, представляющего собой два соединенных последовательно выпрямителя с номинальной мощностью $P = 23,7$ кВт [61].

Для более устойчивого горения электрической дуги, горящей между графитовым и подовым электродом, и создания условий, близких к реальным в ДСП, на подовый электрод подкладывалась металлическая заготовка для образования жидкого металла.

Для создания равных условий эксперимента и горения электрической дуги фиксированной мощности поддерживалась одинаковая сила тока и напряжения на электрической дуге. Для каждого типа электродов было выполнено по 10 опытов по 5 минут.

В ходе эксперимента велась скоростная видеосъемка (240 кадров в секунду) режима горения электрической дуги через защитный экран. Результаты видеосъемки были подвергнуты цифровой обработке с помощью программы (Приложение А), написанной в среде Blitz 3d. Суть обработки заключалась в разбиении полученного в ходе эксперимента видео на кадры с последующим переводом кадров из цветного спектра в серый. Затем каждый кадр подвергался оценке каждого пикселя по яркости (пиксели с высокой яркостью оценивались как электрическая дуга, с низкой - как свободное пространство) [61].

Анализ полученного в ходе эксперимента видеоматериала (рис. 2.4) позволил установить, что величина степени выдувания электрической дуги из-под электрода определяется отношением $d_{отв}/D_{эл}$.

Отношение

$$d_{отв}/D_{эл}$$

0

0,05

0,1

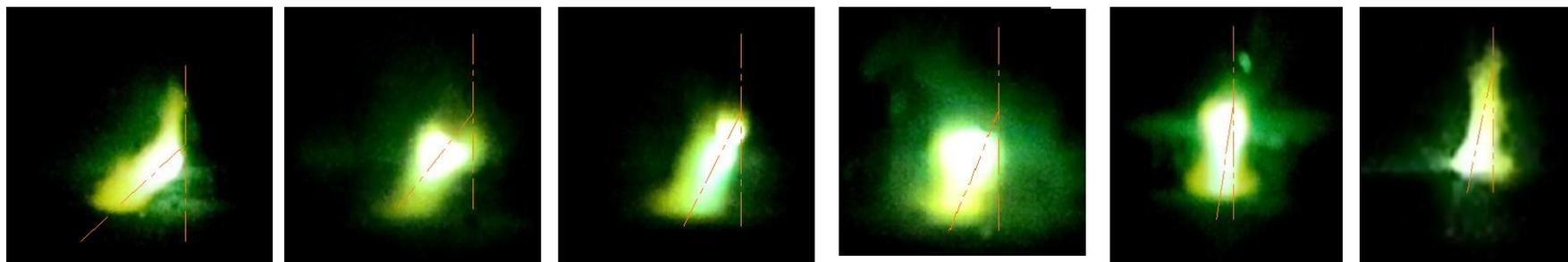
0,15

0,2

0,25

СНИМОК

дуги



Отношение

$$d_{отв}/D_{эл}$$

0,3

0,35

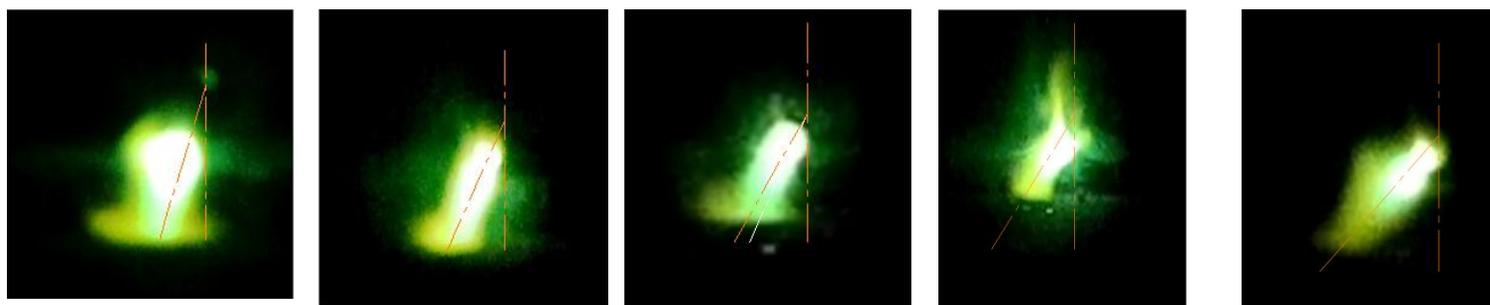
0,4

0,45

0,5

СНИМОК

дуги

Рисунок 2.4 - Фотографии электрической дуги при различном отношении $d_{отв}/D_{эл}$

По результатам обработки полученных данных был построен график зависимости угла отклонения электрической дуги от оси электрода при различном отношении $d_{отв}/D_{эл}$ (рис. 2.5), из которого следует, что наименьший угол отклонения электрической дуги достигается при, $d_{отв}/D_{эл}=0,2$ [61].

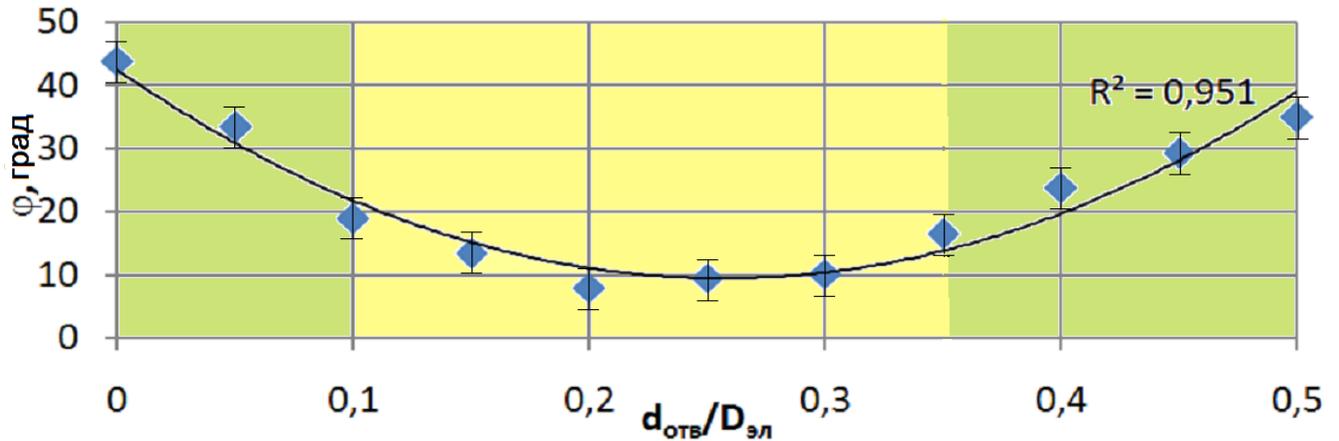


Рисунок 2.5 - График зависимости угла отклонения электрической дуги от отношения $d_{отв}/D_{эл}$

По результатам статической обработки экспериментальных данных была получена зависимость (2.24), позволяющая оценить влияние диаметра отверстия в трубчатом электроде на величину угла отклонения электрической дуги от оси электрода:

$$\varphi = 502,6 \left(\frac{d_{отв}}{D_{эл}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{отв}}{D_{эл}} \right) + 42,56 \quad (2.24)$$

В результате анализа полученных данных установлен диапазон (0,1 - 0,35) отношений диаметра отверстия к диаметру трубчатого электрода, при котором достигается меньший угол отклонения электрической дуги от оси электрода; в котором наименьший угол отклонения электрической дуги достигается при $d_{отв}/D_{эл}=0,2$, что подтверждает данные Огорокова Н.В., Никольского Л.Е., Егорова А.В. Это можно объяснить характером возникающих электромагнитных полей в трубчатом электроде [61].

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

В настоящее время большинство современных ДСП работают на графитированных электродах, мировое производство которых в последние годы превышает 1 млн. т. год. Качество электродов и условия работы ДСП в первую очередь определяют расход электродов в процессе электроплавки стали. Снижению показателя расхода графитированных электродов способствуют повышение плотности, уменьшение пористости, снижение содержания зольных примесей в электродной массе, повышение предела прочности и снижение удельного электрического сопротивления [62].

Основные требования, предъявляемые к графитированным электродам [63]:

- а) обладать высокой электропроводностью;
- б) иметь низкую теплопроводность;
- в) иметь повышенную температуру начала окисления на воздухе;
- г) обладать низким содержанием серы и зольных примесей;
- д) иметь высокую механическую прочность и хорошую обрабатываемость.

Одним из существенных показателей качества электродов является допустимая плотность тока Δi (А/см²), по которой можно судить о пропускной способности электрического тока у электрода того или иного диаметра. По допустимой плотности тока рассчитывается диаметр электрода [63].

В таблице 2.1 представлены допустимые плотности тока отечественных графитированных электродов высшего сорта марок ЭГО и ЭГ1, выпускаемых по ГОСТ 4426-71.

Таблица 2.1 - Допустимые плотности тока отечественных графитированных электродов высшего сорта марок ЭГО и ЭГ1, выпускаемых по ГОСТ 4426-71

Диаметр электрода, мм	100	150	200	250	300	350	400	500	555	610
Плотность тока, А/см ²	32	26	23	21	19	18	16	15	15	12-14

ДСП, работающие на сравнительно небольших токах (< 45 кА), снабженные трансформаторами малой либо средней мощности, работают на сравнительно недорогих электродах обычного качества. Сверхвысокомощные ДСП работают на токах ≈ 100 кА, в связи с этим электроды должны обладать низким электрическим сопротивлением, высокой плотностью и прочностью, способностью выдерживать большие механические усилия и токовые нагрузки, образующиеся при работе трансформатора дуговой печи высокой мощности, и менее подверженные поломкам. Спец электроды должны обеспечить допустимую плотность тока $25 - 30$ А/см². На сегодняшний момент низкое качество электродов является одной из главных причин недостаточно эффективной работы сверхмощных ДСП. В России на электродуговых печах высокой мощности (100 И6-И7, 150-т печах ВТЗ и ОЭМК) используют электроды диаметром 610 мм, приобретаемые у ведущих зарубежных компаний США, Японии, Германии, Англии [62].

Высокая стоимость графитированных электродов, насыщенность рынка способствуют постоянному проведению сравнительных исследований электродов с целью оптимизации их потребления, в частности электродов диаметром 610 мм для ДСП сверхвысокой мощности.

Исследования высокоплотных электродов фирм «Токай», «SDK» и «COVA» и рядовых электродов фирм «UKAR», «NCK», «AGL» и «SEC», показали, что первая группа графитированных электродов характеризуется равномерной пористостью и повышенной плотностью, тогда как у второй группы электродов преобладают крупные поры. Свойства рядовых и высокоплотных электродов отличаются соответственным образом. Основные отличия высокоплотных электродов включают в себя: высокая механическая прочность; низкое удельное электросопротивление (УЭС); пониженная анизотропия свойств перпендикулярно и параллельно оси прессования [62].

Электроды также можно разделить на две группы по степени совершенства кристаллической структуры. Образцы фирм «Токай», «SDK», «UCAR», «SEC»

относятся к первой группе. Эти образцы характеризуются большими размерами монокристаллических пластин с незначительной разориентировкой друг относительно друга. Ко второй группе относятся образцы производства «AGL» и «COVA», которые различаются разориентацией монокристаллических пластин, что характеризует повышенное УЭС электродов этих производителей [62].

Различия исследованных электродов были также установлены в ходе анализа морфологии поверхности графитов. В электродах фирмы «SDK», относящиеся к группе высокоплотных электродов, обнаружены группы протяженных микропор при наличии однородной поверхности. В электродах фирмы «COVA» обнаружены скопления крупных микропор сферической формы. Эти различия обуславливают и различия в анизотропии свойств этих электродов, особенно по УЭС и модулю упругости [62].

Физико-механические свойств графитированных электродов зависят от их микроструктуры, кристаллической структуры, морфологии микропористости. Среди исследованных высокоплотных графитированных электродов наилучшими свойствами обладают электроды фирм «Токай» и «SDK», из рядовых можно выделить электроды производства «UCAR», «SEC», «NCK». Электроды, произведенные фирмой «AGL», имеют самые высокие значения удельного электросопротивления и низкие показатели механической прочности. Комплекс свойств высокоплотных электродов позволяет снизить их удельный расход при выплавке стали на 20-35 % [62].

Высококачественные электроды для сверхмощных дуговых печей изготавливают по довольно сложной технологии. Получение необходимых свойств электродов достигаются путем использования дорогостоящих высококачественных шихтовых материалов с малым содержанием зольных примесей (в основном, игольчатого нефтяного кокса), прессового оборудования высокой мощности, пропитки заготовок электродов пековыми связующими, специальной сложной и длительной обработки при высокой температуре

(операции графитизации). Очень высокий ценник (1500-2000 долл. США за 1 т.) на специальные графитированные электроды предназначенные для сверхмощных ДСП определяется большим расходом электроэнергии при их изготовлении и высокой стоимостью шихтовых материалов [63].

На сегодняшний момент при выплавке углеродистых марок стали затраты на графитированные электроды при работе ДСП малой и средней мощности составляют 8 % себестоимости продукции, при работе сверхмощных ДСП затраты могут превысить 15 % себестоимости, в отдельных случаях достигают 30 %. Расход графитированных электродов колеблется в значительных пределах, которые при нормальной работе печей составляют 4 - 8 кг/т (в хорошо налаженной сверхмощной ДСП расход графитированных электродов составляет 4 кг/т стали) [63]. Мероприятия, связанные со снижением величины расхода графитированных электродов имеют большое значение для увеличения технико-экономических показателей производства стали. На расход электродов влияет не только само их качество, но и такие параметры, как конструкция ДСП, технологические и режимные факторы плавки, температура и характер атмосферы печи, группа применяемого лома, марка выплавляемой стали, применение топливно-кислородных горелок и т. д. [62].

Основные потери графитированных электродов при плавке стали можно разбить на три группы [62]:

- 1) сублимация графита в области горения дуги и растворение графита в шлаке (эрозия торцов или расход рабочих концов графитированных электродов);
- 2) окисление графита с боковых поверхностей электродов (расход боковой электродной поверхности);
- 3) потери из-за поломок электродов и неиспользования огарков (промежуточный расход электродов).

В процентном соотношении потери графитированных электродов представлены в таблице 2.2 [63].

Таблица 2.2 - Потери графитированных электродов

Вид потерь	Обычные ДСП	Сверхмощные ДСП
Эрозия торцов электродов	15-30	50
Окисление боковой поверхности электродов	55-75	40
Поломок электродов и огарки	10-20	10

Меры, применяемые для снижения расхода графитированных электродов [63]:

- увеличение длины дуг для снижения эрозии электродов;
- герметизация печи и особенно приэлектродного пространства в своде для препятствия взаимодействия с воздухом;
- применение покрытий, защищающих от агрессивной атмосферы печи, на основе ферросилиция, алюминия, силикокальция и других веществ;
- использование водоохлаждаемых комбинированных электродов (длина водоохлаждаемой части от 1/3 до 1/2 от длины свечи);
- использование трубчатых электродов.

Расход рабочих концов электродов описан эмпирическим выражением:

$$Q_э = cP_{акт} \quad (2.25)$$

где $Q_э$ - износ электродов, кг/ч, при выполнении расчета для трех электродов печи; c - постоянная.

Поскольку работая с короткими дугами характерно большое значение токов, то можно сказать, что износ торцов существенно увеличивается при снижении длины дуги. В зоне горения дуги путем переноса большего числа заряженных частиц усиливается процесс сублимации графита; из-за увеличения времени контакта электрода со шлаком происходит усиление процесса

растворения графита. Работая на высоком вторичном напряжении, т.е. при длинных дугах, возможно значительно снизить расход электродов, так как снизится величина эрозии рабочего торца электрода. Эффективно вести плавку на длинной дуге в течение всего времени плавки и тем самым снизить процесс эрозии рабочих торцов электродов позволяет применение водоохлаждаемых элементов в футеровке ДСП высокой мощности. Сокращение длительности работы под током способствуют снижению эрозии торцов электродов.

Применение защитных покрытий, на боковой поверхности графитированных электродов, на основе силикокальция, алюминия и других веществ являются перспективным вариантом для экономии электродов в ходе их эксплуатации на дуговых сталеплавильных печах. В 60-х годах прошлого века в Болгарии процесс нанесения был запатентован и впервые внедрен. В России установка для нанесения покрытия из Al на электрод имеется на НЛМК. Экономия электродов от данного метода составляет 16-27 % в зависимости от диаметра электрода [62].

Относительно низкая адгезия покрытия, многостадийность процесса и дорогостоящие материалы являются основными недостатками использования покрытий на основе алюминия и способа его нанесения, по сравнению с другими типами покрытий. Более целесообразно в качестве покрытия использовать карбидообразующие элементы, такие как: хром, железо, титан, кремний и др. Основными преимуществами защитных покрытий на основе ферросплавов перед алюминиевыми являются: лучшая адгезия к графиту, равный коэффициент термического расширения материала покрытия и электрода (характеризует термическую стабильность покрытия), высокая стойкость к окислению, сниженная в 10 раз газопроницаемость. Промышленные испытания на Волгоградском металлургическом заводе «Красный Октябрь» электродов с нанесением покрытия на основе ферросплавов показали снижение на 7-10 % их удельного расхода в сравнении с электродами с покрытием на основе

алюминия [62]. Использование покрытий на основе ферросилиция обеспечивает снижение расхода еще на 6% по сравнению с использованием покрытия из алюминия [63].

Обычно при работе дуговой печи температура рабочего конца графитированного электрода достигает 4000° С (температура сублимации графита). В 100-т печи участок электрода, подвергающийся окислению, может иметь длину 6 м. Если большую часть из них заменить водоохлаждаемым металлическим цилиндром, а остальную часть выполнить графитированной, то окисляться будет только графитированный участок, в результате чего расход графитированных электродов вследствие окисления боковой поверхности уменьшится [63].

Применение водоохлаждаемой конструкции электрода позволяет снизить расход графитированных электродов на 25-30 % [63].

Значительный эффект может быть достигнут при сочетании метода защитных покрытий и применения водоохлаждаемой конструкции свечи. Расход электродов путем окисления их поверхности в первую очередь зависит от таких факторов как: общая площадь поверхности электрода, взаимодействующая с печными газами; скорость перемещения газов в печи и их химический состав; температура поверхности электродов, общая длительность плавки; степень герметизации печи. За счет повышения качества электродов, создания рациональной технологии плавки, уменьшения высоты печи и как следствие длины электродов, если это возможно, уменьшения диаметра электрода (без повышения температуры электрода), улучшения герметизации печи, применения защитных покрытий, изолирующих поверхность электрода от контакта с кислородом, расход графитированных электродов путем окисления поверхности может быть снижен [63].

Повышение качества электродов за счет повышения плотности электродной массы в настоящее время практически исчерпаны. Только при работе на

тяжеловесной шихте появляется возможность уменьшить поверхность контакта электродов с окисляющими газами за счет снижения высоты рабочего пространства печи и длины электродов [63].

Так же большой эффект может быть достигнут путем улучшения герметизации рабочего пространства ДСП и уменьшения количества окислительных газов, которые проходят через печь. В связи с этим необходимо произвести в своде эффективное уплотнение электродных отверстий (для печей работающих по классической технологии) [63].

Используя подготовленную шихту, рациональную шихтовку, загрузку и электрический режим работы печи, устраняя обвалы шихты во время расплавления, осторожное обращение с электродами во время транспортировки и складирования можно достичь снижения расхода электродов в виде огарков, потерь за счет поломок электродов и при остановках печи на ремонт. Ниппельное соединение, ближайшее к электрододержателю, больше всего подвержено поломке. Одной из основных причин поломок электродов при больших токовых нагрузках в сверхмощных ДСП является перегрузка ниппеля от теплового расширения. Для снижения числа поломок пытаются увеличить прочность ниппельных соединений и самого ниппеля. Существуют попытки изготовления составных электродов без ниппельного соединения. В этом случае резьбовые соединения изготавливают непосредственно из тела электрода, и ниппель здесь не нужен. Важными преимуществами такого соединения являются снижение электрического сопротивления, уменьшение тепловых нагрузок в соединении и снижение риска поломки электрода при эксплуатации печи. Основным недостатком является то, что при поломке электрода необходимо повторно вытачивать элемент соединения, поэтому необходимо очень осторожно обращаться с электродами такого типа [63].

Вследствие не отработанной до конца технологии плавки, а также отсутствия возможности осуществлять необходимую подготовку шихты, на

большой части отечественных металлургических предприятиях удельный расход электродов значительно больше среднего уровня расхода электродов на зарубежных предприятиях [63].

2.5 Лабораторные исследования по изучению влияния диаметра отверстия в трубчатых электродах на их расход и прочностные характеристики

Проведенный анализ научно-технической литературы [3, 64-66] показал, что затраты на электроды существенно влияют на себестоимость стали и составляют от 8 % до 30 % от общих затрат на производство. Поэтому очень важно рассмотреть вопрос влияния отверстия в трубчатых электродах на их расход.

В связи с этим для изучения расхода в результате эрозии торцов электродов и окисления графита с боковой поверхности электродов были выполнены лабораторные исследования на электропечной установке, представленной на рисунке 2.3. Замеры расхода электрода по длине и по массе производили после каждого опыта описанного в разделе 2.3. Результаты представлены в таблице 2.3. Таблица 2.3 - Результаты проведения эксперимента на лабораторной электропечной установке с различными типами электродов

Тип электрода	$d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}}$	Расход по массе, г ($\pm 0,03$)	Расход по длине, мм ($\pm 0,05$)
Сплошной	0	27,7	13,1
Трубчатый	0,05	30,3	14,4
	0,1	32,3	15,4
	0,15	33,6	16,2
	0,2	34,5	16,9
	0,25	35,1	17,7
	0,3	35,6	18,5
	0,35	36,1	19,4
	0,4	36,5	20,5
	0,45	36,8	21,8
	0,5	37,1	23,4

Для сравнения показателей стойкости сплошных и трубчатых электродов при использовании в ДСП были выполнены расчеты прочностных характеристик электродов диаметром $D_{эл} = 300$ мм, применяемых на 6-и тонных ДСП ОАО "Оскольского завода металлургического машиностроения". Графитированный электрод здесь состоит из трех секций, соединенных между собой ниппелем. Общий вид ниппельного соединения изображен на рисунке 2.6.

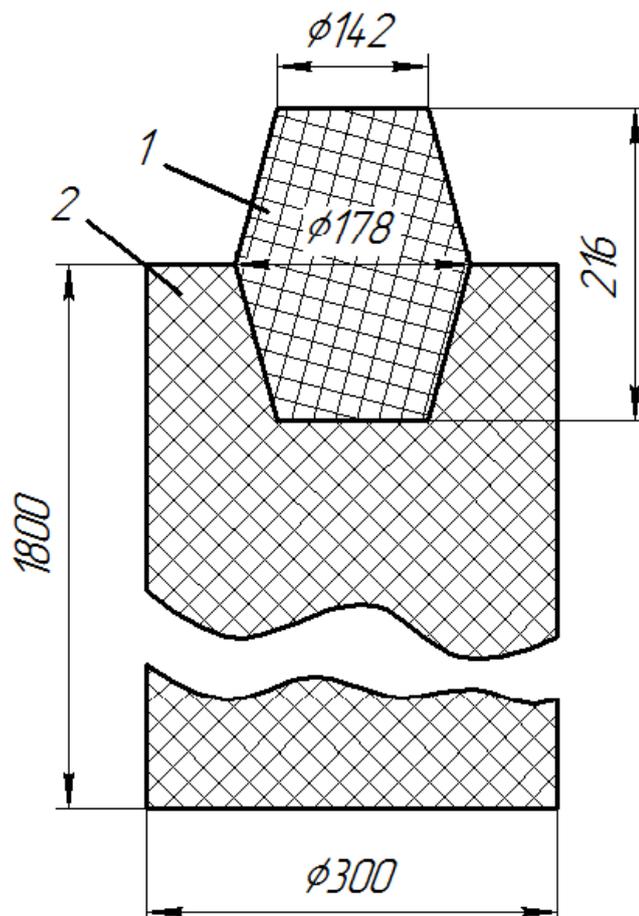


Рисунок 2.6 - Общий вид ниппельного соединения: 1 - ниппель, 2 - секция электрода

Исходными данными при расчете служили физические, механические и геометрические характеристики графита, приведенные в таблице 2.4. Расчет прочностных характеристик выполнялся в программе "Ли́ра". Результаты расчета представлены в таблице 2.5. Результаты расчета максимального изгибающего момента до разрушения электрода в ниппельном соединении представлены в виде эпюр на рисунке 2.7.

Таблица 2.4 - Физические, механические и геометрические характеристики графита для расчета электрода на прочность

Параметры	Значение	Единица измерения
Модуль упругости	$8,0 \cdot 10^9$	Н/м ²
Коэффициент Пуассона	0,3	-
Массовая плотность	1620	кг/м ³
Предел прочности при растяжении	$1,5 \cdot 10^7$	Н/м ²
Предел прочности при сжатии	$2,2 \cdot 10^7$	Н/м ²
Предел текучести	$3 \cdot 10^7$	Н/м ²
Длина секции электрода	1,8	м
Диаметр ниппеля в верхней части	0,142	м
Диаметр ниппеля в нижней части	0,178	м
Диаметр отверстия в трубчатом электроде	0,03 и 0,06	м

Таблица 2.5 - Результаты расчета прочности ниппельного соединения для электродов с различным отношением $d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}}$

$d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}}$	График подобласти: напряжение, $\cdot 10^4$ Па	Срез, напряжение, $\cdot 10^4$ Па	График перемещения, $\cdot 10^{-6}$ м
0	5,179	2,934	6,23
0,1	5,332	3,007	6,348
0,2	5,821	3,224	6,492

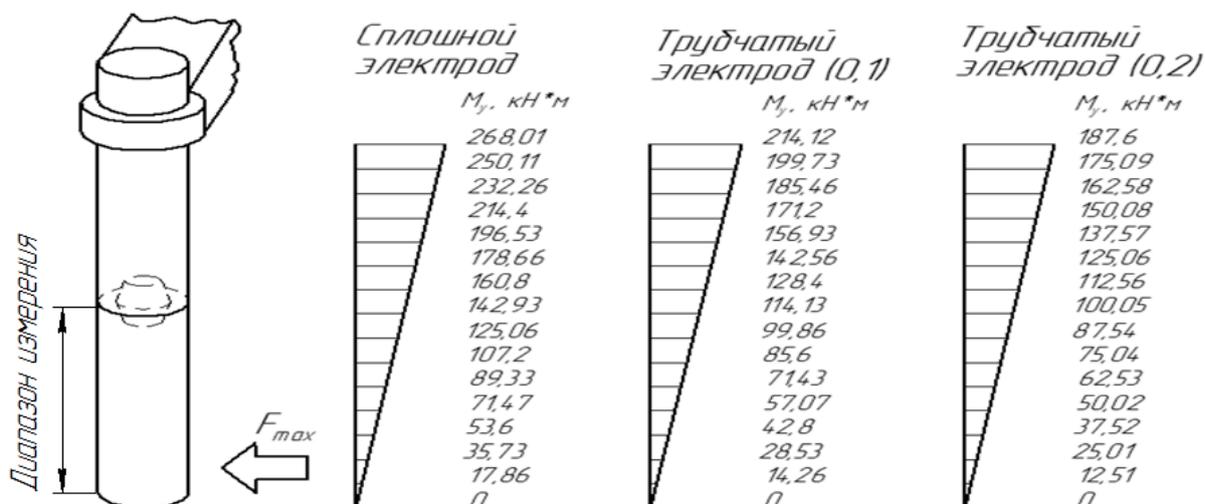


Рисунок 2.7 - Результаты расчета максимального изгибающего момента до разрушения электрода в ниппельном соединении

Анализируя полученные в результате моделирования данные, можно сделать следующие выводы: для электрода сплошного сечения в верхней части ниппеля максимальная величина статического напряжения равняется 51,79 кПа, а для трубчатого в той же области с отношением $d_{ом\theta}/D_{эл} = 0,1$ - 53,32 кПа и с отношением $d_{ом\theta}/D_{эл} = 0,2$ - 58,21 кПа, что выше чем у сплошного электрода и трубчатого с отношением $d_{ом\theta}/D_{эл} = 0,1$ на 2,9 % и 12,4% соответственно. Это объясняется отсутствием у электрода сплошного сечения отверстия, которое является концентратором напряжения, приводящего к более равномерному распределению нагрузки по площади ниппеля. При этом для сплошного электрода максимальное значение статического перемещения относительно оси электрода составляет $6,23 \cdot 10^{-6}$ м, а для трубчатого с отношением $d_{ом\theta}/D_{эл} = 0,1$ и $0,2$ соответственно $6,348 \cdot 10^{-6}$ м и $6,492 \cdot 10^{-6}$ м, что отличается на 1,8% и 4,2%, т.е. незначительно.

Полученные эпюры моментов (рис. 2.7) позволяют оценить стойкость электродов в момент обвала шихты в период проплавления колодцев в металлошихте. Из проведенного анализа видно, что сплошной электрод может выдерживать нагрузку выше, чем трубчатый с отношением $d_{ом\theta}/D_{эл} = 0,1$ и $0,2$ на

20,2 % и 30,1 % соответственно. Однако если применять современные системы автоматизации процессов электроплавки и соблюдать рациональные условия шихтовки (увеличив насыпную плотность лома или использовать ГБЖ в качестве шихты), то потеря трубчатых электродов от обвалов шихты будет минимизирована и не сильно отличаться от потерь при работе на сплошных электродах.

На основе анализа обобщенных данных компьютерного моделирования и эксперимента можно сделать следующий вывод, что оптимальным отношением диаметра отверстия к диаметру электрода с точки зрения эксплуатационных характеристик является $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$, обеспечивающее снижение расхода электродов по длине на 9 % и повышение прочностных характеристик на 10 % в сравнении с отношением, обеспечивающим минимальный угол отклонения электрической дуги.

2.6 Выводы по главе 2

Рассмотрены общие характеристики параметров электрических дуг как источника тепловой энергии в ДСП, вопросы выдувания электрических дуг в сторону футеровки. Разобраны основные факторы, влияющие на расход и прочность электродов в процессе электроплавки стали.

Выполнены лабораторные исследования по изучению влияния диаметра отверстия в трубчатом электроде на угол отклонения электрической дуги, а также на их расход и прочностные характеристики.

В результате анализа полученных данных установлен диапазон (0,1 – 0,35) отношений диаметра отверстия к диаметру трубчатого электрода, при котором достигается снижение угла отклонения электрической дуги от оси электрода в два раза от 40° до 20°. Наименьший угол отклонения электрической дуги достигается при $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$, что подтверждают данные Огорокова Н.В., Никольского Л.Е.,

Егорова А.В. Однако рациональным отношением диаметра отверстия к диаметру электрода с точки зрения эксплуатационных характеристик является $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$, обеспечивающее снижение расхода электродов по длине на 9 % и повышение прочностных характеристик на 10 % в сравнении с отношением 0,2, обеспечивающим минимальный угол отклонения электрической дуги.

Исходя из полученных результатов, для дальнейших сравнительных исследований были выбраны электроды сплошного сечения и трубчатого с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$ и 0,2.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДСП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Анализ научно–технической литературы [48, 67-72] показал, что по мере повышения мощности электропечной установки интенсивность теплового облучения футеровки достигает очень высоких значений. В ходе эксплуатации ДСП установлено, что наибольшему облучению подвергаются зоны расположенные напротив электродов, что приводит к более интенсивному разрушению огнеупорной футеровки в этих зонах или повышению тепловых потерь с охлаждающей водой (при использовании водоохлаждаемых элементов). Так в трехфазных печах с электродами, расположенными по вершинам равностороннего треугольника, боковая поверхность стен облучается неодинаково, максимальное излучение приходится на участки футеровки, расположенные непосредственно против электродов, минимальное излучение на участки, расположенные между электродами (рис. 3.1) [67].

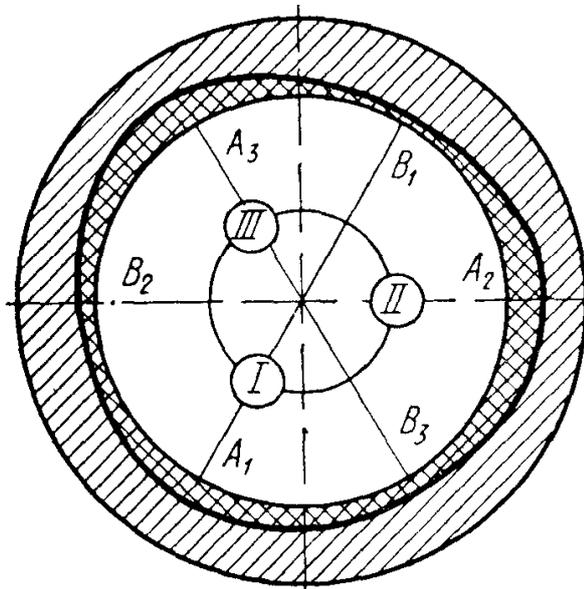


Рисунок 3.1 - Точки максимального (А) и минимального (В) облучения стен электрическими дугами и разгар футеровки стен на уровне электрических дуг

Как следствие существует большое количество работ направленных на решение данной проблемы.

Так в 1962 г. американский исследователь Швабе предложил использовать коэффициент износа футеровки, который учитывал электрические параметры печи и условия работы футеровки [73, 48]. Выполненные им исследования позволили установить, что для снижения износа футеровки необходимо работать на низком напряжении электрической дуги и увеличить расстояние от торца электрода до футеровки. Поэтому следующие два десятилетия были посвящены разработке способов повышения коэффициента износа футеровки за счет улучшения электрических и конструктивных параметров ДСП, а именно:

- снижение напряжения на электрической дуге;
- определение оптимальных форм ванны и кожуха печи;
- определение оптимальных размеров распада электродов;
- оптимизации электрических режимов плавки.

С целью облегчить слив металла из печи, а так же увеличить срок службы огнеупорной футеровки стен и свода, глубина ванны печи была уменьшена, а ее диаметр увеличен при одновременном укорочении вторичного токопровода, что способствовало снижению потерь мощности в токопроводе.

На печах, использующих ток 60-80 кА для повышения стойкости футеровки стен стремились уменьшить толщину огнеупорной кладки, тем самым снижая расстояние от торца электрода до футеровки [48].

Одним из революционных моментов в развитии конструкции современных ДСП стало замена огнеупорной футеровки на водоохлаждаемые элементы. Условием успешного внедрения водоохлаждаемых элементов является получение экономического эффекта, определяемого как разница затрат от внедрения водоохлаждаемых элементов, дополнительного расхода воды и возможного увеличения тепловых потерь, с одной стороны, и снижения расхода огнеупоров и затрат на горячие ремонты, возможного повышения производительности печи за

счет увеличения вводимой в печь мощности, с другой стороны. Уменьшение тепловых потерь достигается при максимальном сокращении жидкого периода плавки, что стало возможным при внедрении внепечной обработки стали [2].

Таким образом, в повышении стойкости стен и сводов ДСП скрыт значительный резерв увеличения производительности дуговых печей и повышения технико-экономических показателей электросталеплавильного производства.

3.1 Исследование облученности стен ДСП с применением трубчатых электродов

Исследование мощности излучения первичного источника энергии, то есть электрических дуг, при использовании трубчатых электродов представляет большой практический и научный интерес. Это в первую очередь важно для повышения эффективности тепловой работы ДСП и технико-экономических показателей работы печей. В ДСП характер облучения поверхности свободного пространства в первую очередь определяется падающими на них тепловыми потоками от электрических дуг.

С целью оценки эффективности тепловой работы ДСП при их работе на электродах различного типа были выполнены исследования на физической модели ДСП, где тепловое излучение электрических дуг было максимально приближено к реальным условиям.

Физическая модель ДСП представляла собой сектор рабочего пространства (рис. 3.2), выполненный из стали и футерованный изнутри магнезитовым порошком с жидким стеклом. Для правильной оценки результатов эксперимента соотношение магнезита и жидкого стекла для каждого опыта бралось в одинаковой пропорции. Модель сектора была выполнена в соответствии с теорией подобия, в масштабе 1:8,5 и соответствовала размерам рабочего

пространства ДСП 6-2Н ОАО "ОЗММ". Общий вид опытной электропечной установки представлен на рисунке 3.3 [74].

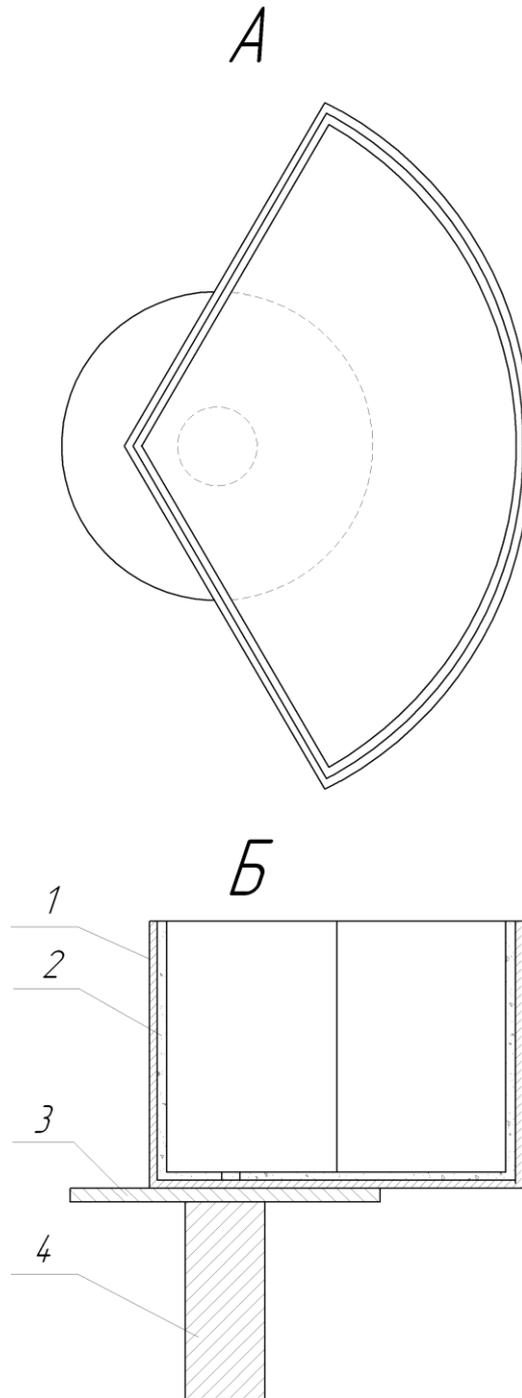


Рисунок 3.2 - Модель сектора дуговой печи: 1 – корпус сектора; 2 - магнетитовая футеровка; 3 – опорная шайба; 4 – металлический стержень, опускаемый в кристаллизатор. (А – вид сверху; Б – вид сбоку)

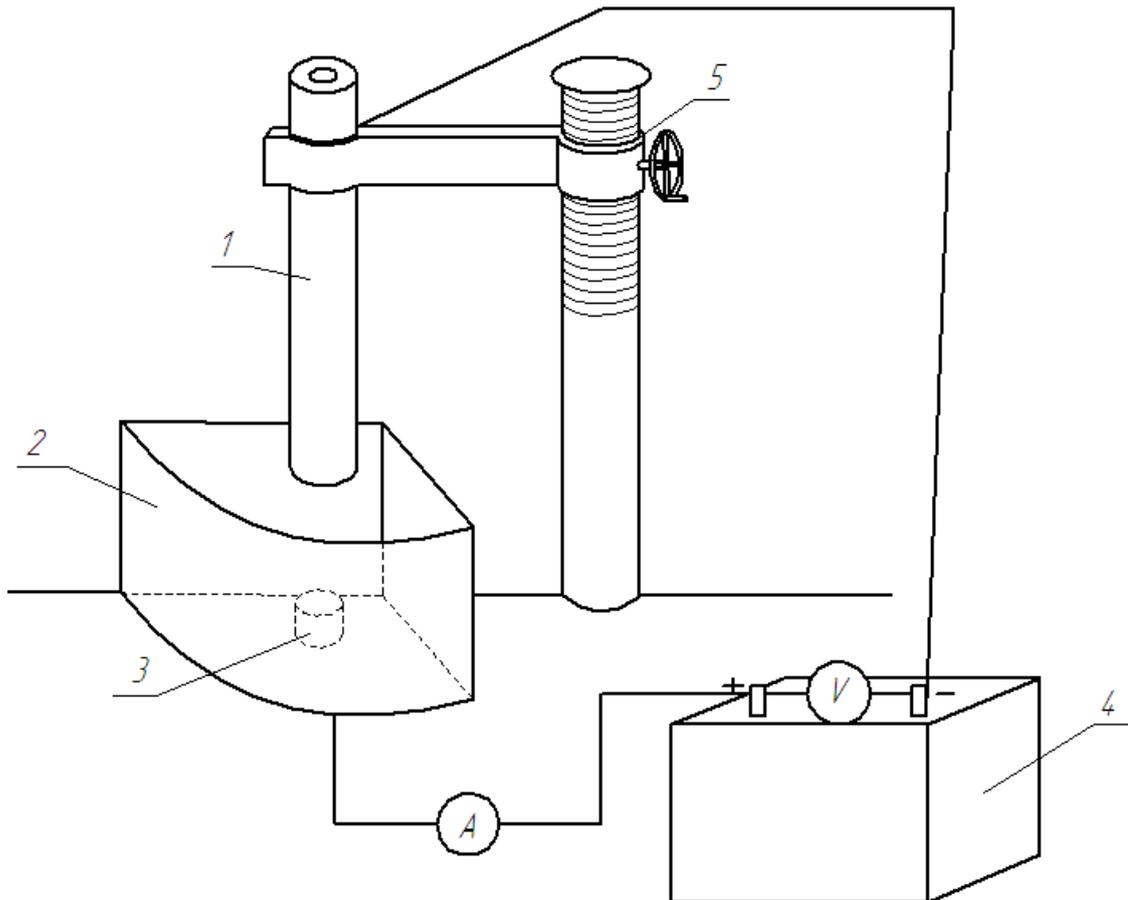


Рисунок 3.3 - Схема экспериментальной установки для изучения интенсивности теплового излучения на футеровку от электрической дуги: 1 – графитированный электрод; 2 – модель сектора печи; 3 – металлическая заготовка; 4 – выпрямитель ВД – 306 У 3; 5 – механизм перемещения электрода

Для получения подобия электрических полей двух печей, в первую очередь необходимо обеспечить их геометрическое подобие. Если в качестве определяющего размера принять диаметр электрода $D_{эл}$ (м), то для соблюдения геометрического подобия необходимо обеспечить равенство следующих критериев [75]:

$$\frac{b}{D_{эл}} = b'; \quad \frac{f}{D_{эл}} = f'; \quad \frac{l}{D_{эл}} = l'; \quad (3.1)$$

где b - расстояние между центрами электродов, м; f - расстояние от центра электрода до стенки печи, м; l - расстояние от торца электрода до шихты, м.

Диаметр ванны печи будет определяться соотношением:

$$D_M = 2 \left(\frac{b'}{\sqrt{3}} + f' \right) D_{эл} \quad (3.2)$$

Для определения условий подобия электрических полей воспользуемся тем, что электрическое поле в печи однозначно определяется следующими уравнениями [75]:

$$\operatorname{div} J = 0 \quad (3.3)$$

$$j = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} \varphi \quad (3.4)$$

и граничными условиями:

- потенциал поверхности слоя с повышенной проводимостью:

$$\varphi_{np} = 0 \quad (3.5)$$

- потенциал части электрода, находящейся в шихте:

$$\varphi_a = \varphi_n \quad (3.6)$$

- потенциал части электрода, на поверхности шихты и боковых стен печи:

$$\frac{\partial E}{\partial n} = 0 \quad (3.7)$$

Физические критерии явления выведем, пользуясь методом А. А. Гухмана [75, 76]. Из приведенных выше уравнений следует, что критерий подобия можно получить лишь с помощью уравнения (3.4). В силу своего вида оно порождает лишь один критерий подобия; он и будет единственным физическим критерием рассматриваемого явления. Для получения критерия подобия необходимо заменить левую и правую части уравнения (3.4) степенными комплексами. Вместо плотности тока будем использовать значение силы тока I_D . Учитывая, что площадь поперечного сечения пути тока пропорциональна квадрату основного

линейного размера, который в нашем случае равен $D_{эл}$, левой части уравнения (3.4) соответствует степенной комплекс [75]:

$$P_1 = \frac{I_D}{D_{эл}^2} \quad (3.8)$$

правой части отвечает степенной комплекс:

$$P_2 = \frac{U_{II}}{\rho D_{эл}^2} \quad (3.9)$$

где U_{II} - полезное фазное напряжение, В; ρ - удельное сопротивление металлической шихты, Ом·м.

Критерий подобия, или так называемый критерий электрического поля, равен отношению этих комплексов:

$$\text{Эн} = \frac{U_{II} D_{эл}^2}{\rho I_D} \quad (3.10)$$

Для одинаковых технологий, когда используется один и тот же сорт шихты, можно считать ρ постоянной величиной. В этом случае критерий подобия примет вид:

$$K_{II} = \frac{U_{II} D_{эл}^2}{I_D} \quad (3.11)$$

где K_{II} - критерий подобия.

Таким образом, для достижения подобия электрических полей двух печей необходимы соблюдение геометрического подобия и равенство значений критерия K_{II} [75].

Основные характеристики промышленной печи и экспериментальной установки, полученные при расчете подобия, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Основные характеристики промышленной печи и экспериментальной установки

Величина	Промышленная печь ОАО "ОЗММ" ДСП-6-2Н	Экспериментальная установка
Ток электрической дуги, А	8220	325
Напряжение на электрической дуге, В	118	40
Диаметр электрода, мм	300	35
Критерий подобия K_{II}	4,3	4,3
Диаметр рабочего пространства, мм	2200	260

На экспериментальной электропечной установке применялись графитированные электроды двух типов: сплошного и трубчатого с наружным диаметром $D_{эл} = 35$ мм. Диаметр отверстия трубчатого электрода составлял 3,5; 7 мм., что соответствовало отношению $d_{отс}/D_{эл} = 0,1$ и $0,2$. Электрические дуги образовывались (горели) между графитовым (верхним) и подовым электродом [74].

Для более устойчивого горения электрических дуг и создания условий, близких к реальным, в ДСП на подовый электрод подкладывалась металлическая заготовка для образования жидкого металла. Электропитание модели осуществлялось от источника, представляющего собой два соединенных последовательно выпрямителя с номинальной мощностью 23,7 кВт [74].

Исследование распределения мощности теплового излучения электрической дуги по поверхности стен проводилось с использованием тепловизионной аппаратуры. В качестве тепловизионной аппаратуры служил тепловизор HotFind DXT с диапазоном измерения температуры от -20 до 1500 °С, обеспечивающий точность измерения ± 2 °С [74].

Эксперимент состоял из трех этапов. На первом этапе осуществлялся контроль теплового излучения на поверхность боковой стенки при использовании сплошного электрода, на втором - трубчатого электрода с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$ и на третьем - трубчатого электрода с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$. Все этапы эксперимента состояли из серии опытов, каждый из которых был разбит на три части: 30, 60 и 90 секунд с момента зажигания электрической дуги.

В ходе проведения эксперимента помимо контроля степени разгара футеровки стен, осуществлялся контроль следующих параметров: сила тока электрической дуги, напряжение электрической дуги, длина электрической дуги, общее время эксперимента, время под током, количество обрывов электрической дуги, которые представлены в таблице 3.2 [74].

Таблица 3.2 - Результаты проведения эксперимента на ЭПУ с различными типами электродов

Тип электрода	Сплошной электрод	Трубчатый электрод ($d_{отв}/D_{эл}=0,1$)	Трубчатый электрод ($d_{отв}/D_{эл}=0,2$)
Общее время эксперимента, сек	180	180	180
Чистое время под током, сек	126,6	136,8	142,2
Общее количество обрывов электрической дуги	64	53	49
Количество обрывов электрической дуги в первой части опыта (30 сек)	5	5	4
Количество обрывов электрической дуги во второй части опыта (60 сек)	20	18	18
Количество обрывов электрической дуги в третьей части опыта (90 сек)	39	33	27
Максимальная сила тока, А	700	730	750

Из анализа данных полученных в ходе эксперимента и представленных в таблице 3.2 следует вывод о том, что при использовании трубчатых электродов

электрическая дуга горит более стабильно, что подтверждается меньшим количеством обрывов электрической дуги и большим временем работы под током. В ходе анализа металлической заготовки (рис. 3.4 а), подвергающейся расплавлению было установлено, что заготовка, расплавленная электрической дугой от сплошного электрода (рис. 3.4 б), имела ярко выраженное боковое расплавление, в сравнении с металлической заготовкой, расплавленной электрической дугой от трубчатых электродов (рис. 3.4 в, г). На основании этого можно сказать, что электрическая дуга, образованная от трубчатого электрода горит более вертикально, что подтверждает данные Огорокова Н.В., Никольского Л.Е., Егорова А.В. о фокусирующем действии отверстия трубчатого электрода на электрическую дугу [77] и результатами эксперимента { глава 2 } [74].

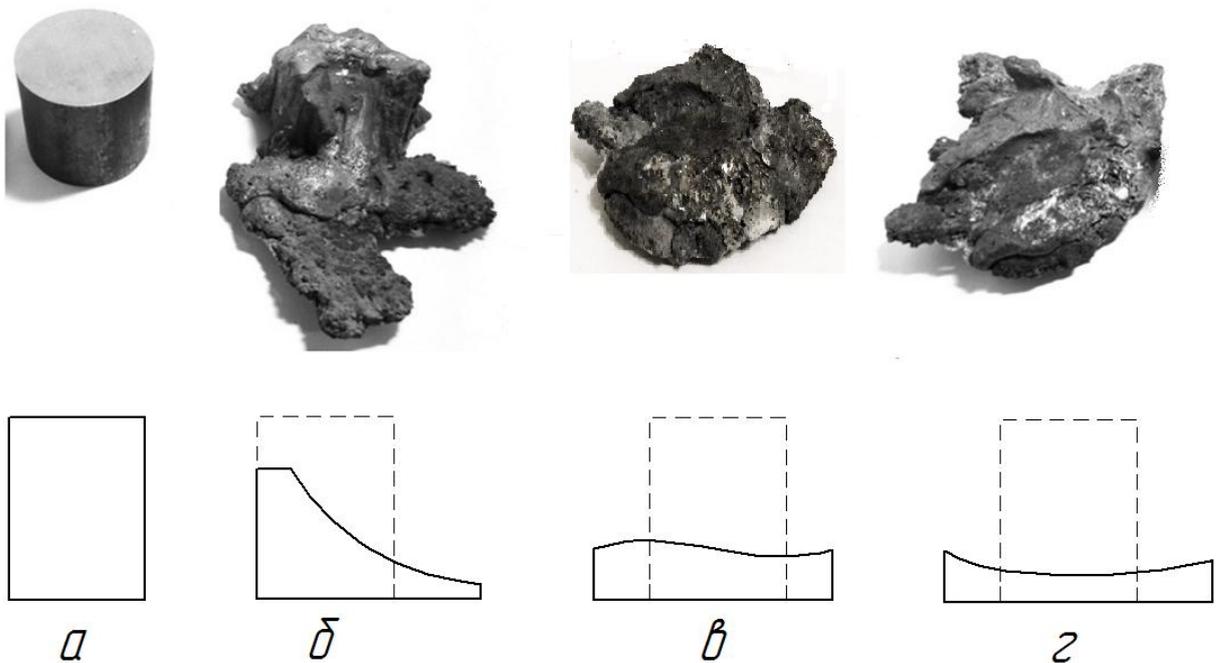


Рисунок 3.4 - Фотография металлической заготовки и схематический характер расплавления: а - до расплавления; б - при расплавлении электрической дугой от сплошного электрода; в - при расплавлении электрической дугой от трубчатого электрода с отношением $d_{ом\epsilon}/D_{эл} = 0,1$; г - при расплавлении электрической дугой от трубчатого электрода с отношением $d_{ом\epsilon}/D_{эл} = 0,2$

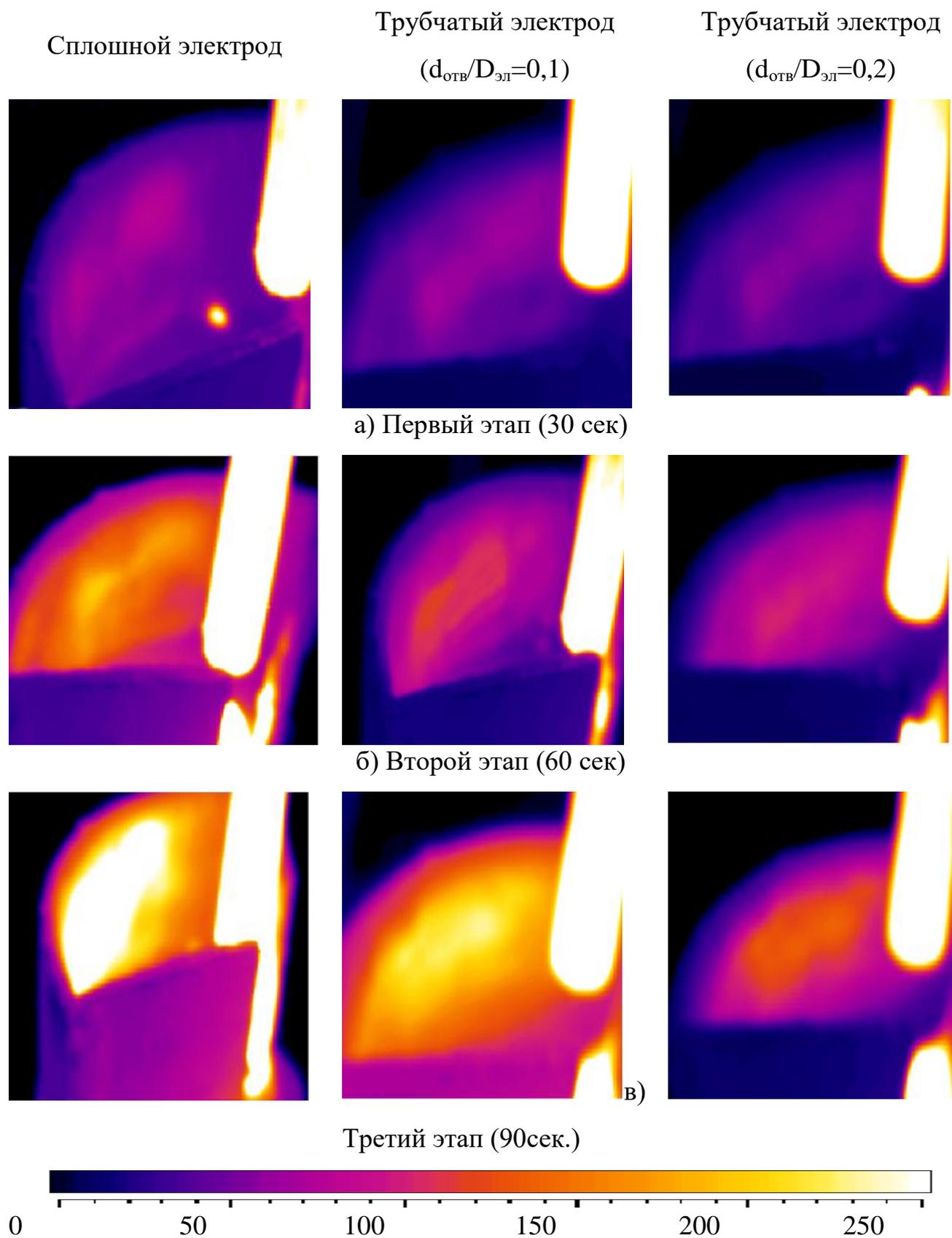


Рисунок 3.5 - Термограммы вертикальной боковой стенки экспериментальной установки во время эксперимента

Сплошной электрод



Трубчатый электрод
($d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}}=0,1$)



Трубчатый электрод
($d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}}=0,2$)



а) Первый этап (30 сек)



б) Второй этап (60 сек)



в) Третий этап (90сек.)

Рисунок 3.6 - Снимки разгара футеровки вертикальной боковой стенки экспериментальной установки в ходе проведения эксперимента

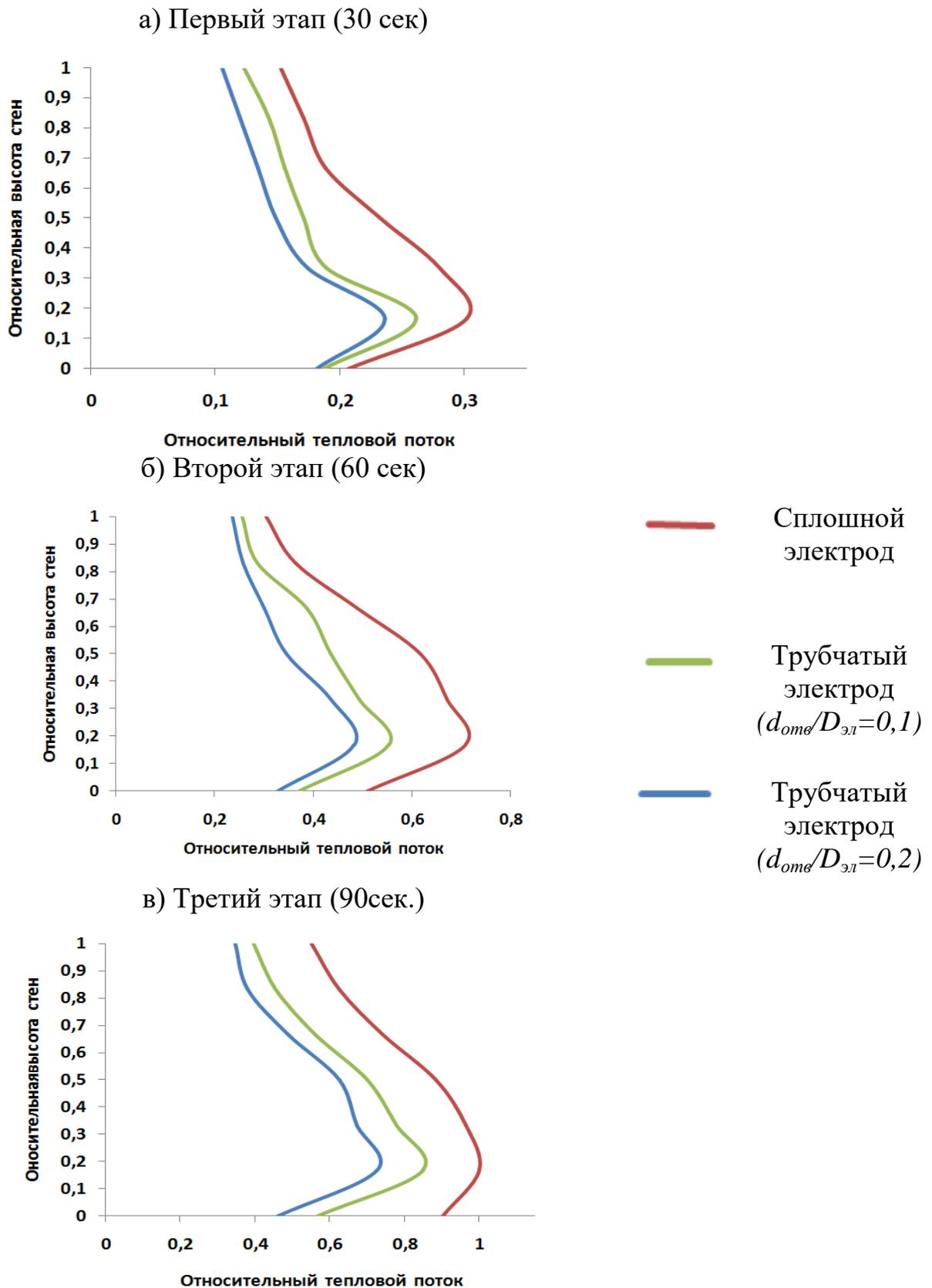


Рисунок 3.7 - Графики распределения теплового потока по центральной части поверхности вертикальной боковой стенки экспериментальной установки в ходе проведения эксперимента

Анализ термограмм и фотографий, полученных в ходе проведения каждой части опытов, представленных на рисунках 3.5, 3.6 и 3.7, показывает, что доля излучения на вертикальную боковую стенку экспериментальной установки ниже при использовании трубчатых электродов в сравнении со сплошным электродом. Данный факт можно объяснить тем, что при использовании трубчатых электродов в сравнении со сплошным электродом, создается более направленный тепловой поток от электрической дуги на поверхность металлической заготовки (металла), а не на стены. Это связано с тем, что электрическая дуга при работе на трубчатом электроде экранируется торцом электрода более сильно, чем на сплошном электроде. Другими словами, использование трубчатого электрода снижает эффект выдувания электрической дуги из под торца электрода и создает более направленный тепловой поток на поверхность металла.

Анализ полученных термограмм с помощью программы SatReport позволил получить характер распределения теплового потока по поверхности вертикальных стен сектора (рис. 3.7). Из полученных графиков видно, что применение трубчатых электродов позволяет снизить величину теплового потока на поверхность стен в наиболее горячей точке в среднем на 18 % (51 °С) у электрода с отношением $d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}} = 0,2$, на 14,5 % (39 °С) у электрода с отношением $d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}} = 0,1$.

Таким образом, применение на ДСП трубчатых электродов позволит снизить температуру поверхности стен, увеличить срок эксплуатации кирпичной футеровки, а также снизить величину тепловых потерь через стены дуговой печи и как следствие сократить удельный расход электроэнергии и повысить технико-экономические показатели выплавки стали в ДСП.

3.2 Изучение и оценка скорости расплавления шихты при использовании трубчатых электродов

Для изучения и оценки скорости расплавления металлической шихты при работе на трубчатых электродах была использована электропечная установка, представленная на рисунке 3.8. Она аналогична электропечной установке, которая была описана в разделе 3.1, но была видоизменена, а именно в качестве подового электрода (анода) была использована графитовая болванка.

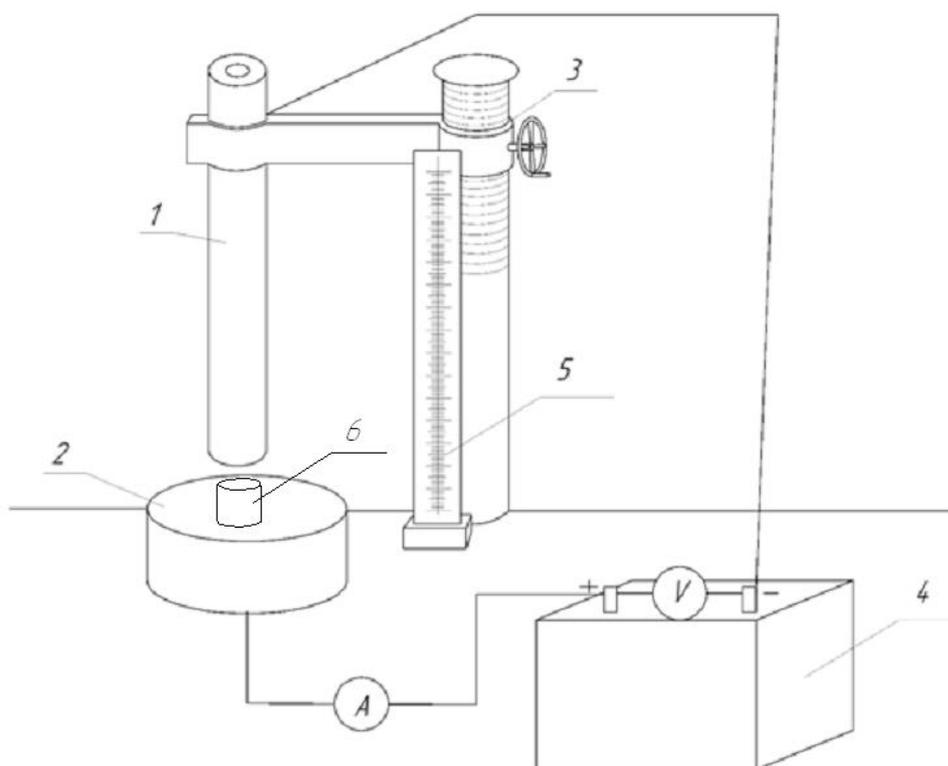


Рисунок 3.8 - Схема экспериментальной установки для изучения скорости расплавления шихты при использовании различных типов электродов: 1 – графитированный электрод; 2 – графитовая болванка; 3 – механизм перемещения электрода; 4 – выпрямитель ВД – 306 У 3; 5 – измерительная шкала; 6 - металлическая заготовка

Методика исследования заключалась в следующем: металлическая заготовка (сталь 45) цилиндрической формы (размер 32×50 мм, массой 300 г.), помещалась на графитовую болванку и подвергалась расплавлению.

Эксперимент состоял из трех этапов: 1 этап – расплавление заготовки с использованием сплошного электрода; 2 этап – расплавление заготовки с использованием трубчатого электрода с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$; 3 этап – расплавление заготовки с использованием трубчатого электрода с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$.

Графитовые электроды, используемые в ходе эксперимента, были аналогичны эксперименту, описанному в разделе 3.1. Для каждого типа электродов была сделана серия из 10 опытов.

В ходе эксперимента велась фото и видео съемка, и производился контроль следующих электрических параметров: сила тока, напряжение, длина электрической дуги. При этом длина электрической дуги в ходе эксперимента поддерживалась одинаковой, контроль длины электрической дуги производили с помощью измерительной шкалы. Также в ходе эксперимента вели контроль времени с момента зажигания электрической дуги до полного расплавления заготовки, без учета времени на обрывы электрической дуги.

Результаты замеров времени расплавления металлической заготовки при использовании электродов различной конструкции представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты проведения эксперимента по расплавлению образца стали 45 на электропечной установке с различными типами электродов

№ плавки	Время расплавления, сек.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	сред.
Сплошной электрод	140	136	137	138	134	139	133	137	135	136	136
Трубчатый электрод ($d_{отв}/D_{эл}=0,1$)	127	128	130	129	126	128	131	129	128	129	128
Трубчатый электрод ($d_{отв}/D_{эл}=0,2$)	122	126	124	123	127	125	127	124	125	122	124

Из анализа данных, представленных в таблице 3.3, следует, что применение трубчатых электродов позволяет сократить продолжительность расплавления металлической заготовки в среднем на 9 % у электрода с отношением $d_{ом\varnothing}/D_{эл} = 0,2$, на 6 % у электрода с отношением $d_{ом\varnothing}/D_{эл} = 0,1$. Этот факт, можно объяснить тем, что применение данного типа электродов позволяет создать более направленный тепловой поток на металлическую заготовку, повысить КПД электрической дуги, что и приводит к уменьшению времени расплавления. Таким образом, применение трубчатых электродов позволяет сократить продолжительность расплавления металлической шихты.

3.3 Выводы по главе 3

Выполнен ряд экспериментальных исследований по оценке эффективности тепловой работы ДСП при использовании сплошных и трубчатых электродов.

В ходе исследования облученности стен ДСП при использовании электродов различного типа было установлено, что применение трубчатых электродов позволяет снизить величину теплового потока на поверхность стен в наиболее горячей точке в среднем на 18 % у электрода с отношением $d_{ом\varnothing}/D_{эл} = 0,2$, на 14,5 % у электрода с отношением $d_{ом\varnothing}/D_{эл} = 0,1$. Следовательно, применение на ДСП трубчатых электродов должно позволить снизить температуру поверхности стен, увеличить срок эксплуатации (стойкость) кирпичной футеровки, а также снизить величину тепловых потерь через стены дуговой печи и, как следствие, сократит удельный расход электроэнергии и повысит технико-экономические показатели выплавки стали в ДСП.

Экспериментальным путем установлено, что применение трубчатых электродов позволяет сократить продолжительность расплавления в среднем на 9 % у электрода с отношением $d_{ом\varnothing}/D_{эл} = 0,2$, на 6 % у электрода с отношением $d_{ом\varnothing}/D_{эл} = 0,1$.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДСП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Особенности тепловой работы ДСП

В ДСП теплогенерация возникает вследствие энергетических преобразований дуговых разрядов над ванной [78, 79]. Согласно общей теории печей Глинкова М.А. дуговые печи относятся к печам-теплообменникам [80, 81] с радиационным режимом работы [82, 35].

Условно рабочее пространство дуговой печи можно разделить на две зоны: ванна печи, которая образована откосами и подиной; свободное пространство, ограниченное поверхностью расплава, футеровкой стен и свода. Энергия образующаяся за счет горения электрических дуг, горящих между расплавом и торцами электродов, передается шихте путем конвекции с горячими газами, излучения, теплопроводности от наиболее горячих точек расплава в зоне пятна электрических дуг, а также при помощи джоулева тепла образующегося в процессе протекания тока через расплав [37].

Кроме того, тепло выделяется за счет протекания в металлической, шлаковой и газовой фазах химических реакций [37].

Качественная картина теплообмена в рабочем пространстве ДСП показана на рисунке 4.1 [37, 83].

Как видно из рисунка 4.1, в свободном пространстве ДСП излучение от открыто горячей дуги падает на поверхность жидкой ванны (q_{3-4} , q_{3-5}) и внутреннюю поверхность стен и свода печи (q_{3-1} , q_{3-2}). Часть падающей лучистой энергии поглощается этими поверхностями, а оставшаяся часть отражается (q_{1-2} , q_{5-2} , q_{1-5} , q_{5-1}) обратно в свободное пространство. Отраженная энергия снова поглощается и переотражается ограничивающими поверхностями и т. д.

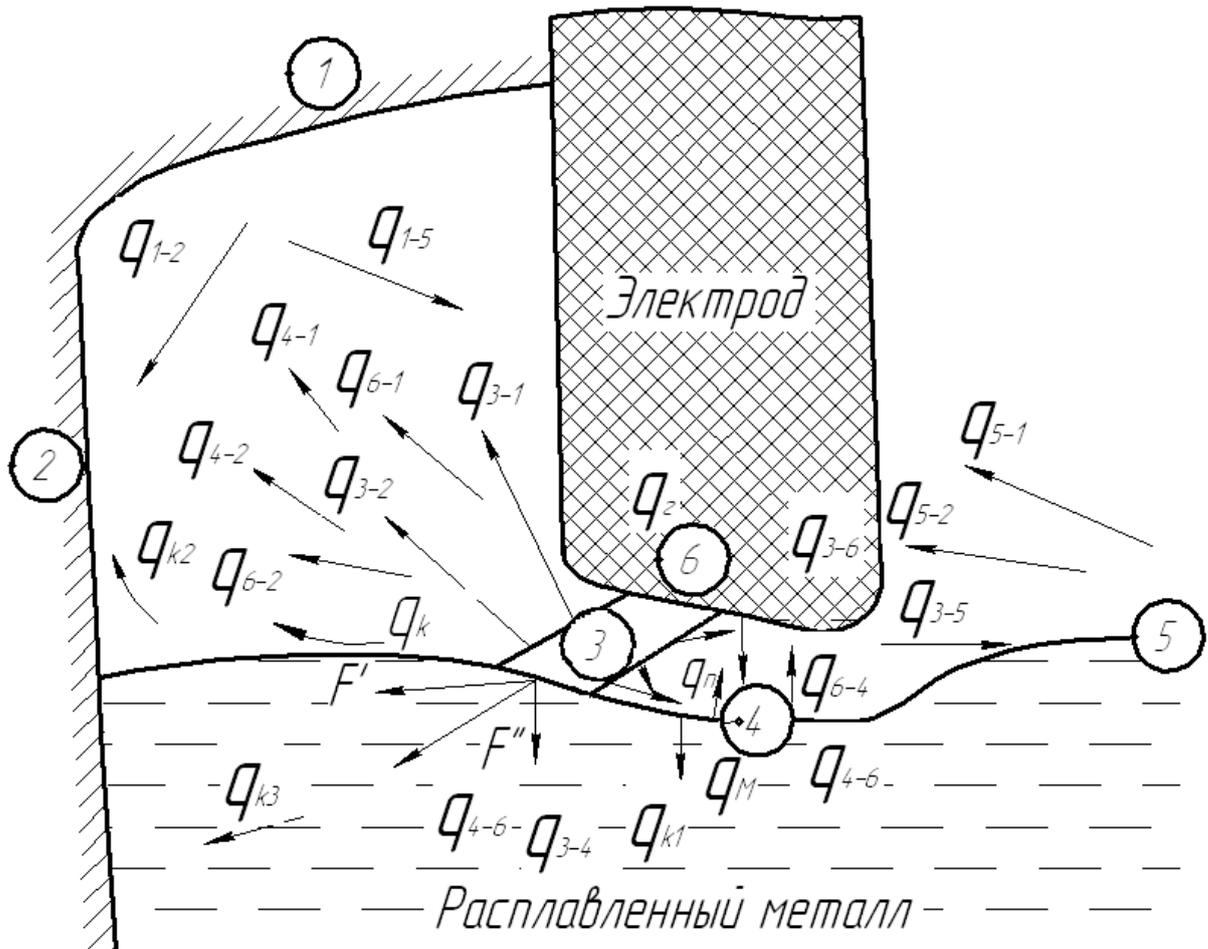


Рисунок 4.1 - Схема теплообмена в свободном пространстве ДСП:

1 – футеровка; 2 – зона нагрева футеровки; 3 – столб электрической дуги; 4 – пятно электрической дуги на металле; 5 – поверхность расплавленного металла; 6 – пятно электрической дуги на торце электрода

Нагретая футеровка стен и свода, жидкий металл, шлак излучают собственную энергию, которая в свою очередь переотражается и поглощается в рабочем пространстве дуговой печи. Передача энергии в свободном пространстве дуговой печи также может происходить за счет конденсации паров графита, шлака и металла образующихся в области горения электрической дуги, на менее нагретых участках электродов, футеровки, скрапа [37].

Падающий в i -ю зону свободного пространства суммарный поток излучения, равняется сумме составляющих его потоков излучения (падающих в эту зону тепловых потоков), что характеризуется принципом аддитивности

излучения. Опираясь на это свойство излучения, поверхностная плотность падающего в i -ю зону теплового потока рассчитывается путем суммирования следующих величин: плотности падающего теплового потока от собственного излучения электрических дуг q_{inD} ; плотности падающего потока, вызванного многократным отражением излучения электрических дуг q_{inO} ; плотности падающего теплового потока от нагретых поверхностей $q_{inП}$; плотности потока излучения от графитированных электродов $q_{inЭ}$; плотности теплового потока, падающего от газовой среды $q_{inГ}$ [84]:

$$q_{in} = q_{inD} + q_{inO} + q_{inП} + q_{inЭ} + q_{inГ} \quad (4.1)$$

Циклическая работа ДСП и нестабильная работа основного источника тепла - электрической дуги делают расчёт теплообмена в дуговой печи очень сложным, однако в период жидкой ванны, когда в результате горения электрических дуг горящих над расплавом поддерживается постоянная температура металла, происходит приближение к стационарному режиму. В остальных случаях только для коротких временных промежутков условия можно считать стационарными [48].

В зависимости от степени выдувания электрической дуги из-под электрода в сторону стен, соотношения диаметра электрода и длины электрической дуги ($D_э/l_D$), толщины шлакового покрова и длины электрической дуги ($\delta_{ш}/l_D$), напряжения столба электрической дуги и анодно-катодного падения потенциала ($U_с/U_{a-k}$), состава шлака, степени экранирования электрической дуги в системе электрическая дуга – ванна - кладка после расплавления шихты - возможны две схемы теплообмена [67]:

1. При сильном экранировании электрической дуги (большая величина $D_э/l_D$ и толстый слой шлака) основное количество тепла электрической дуги поглощается ограниченным объемом, расположенным под электродами. Диаметр «горячей зоны», в которой тепло от электрической дуги передается металлу

непосредственно теплопроводностью и на которую приходится около 90% всего излучения [67].

При такой схеме теплообмена металл нагревается теплопроводностью от горячих зон под электрическими дугами, а шлак, находящийся за пределами горячих зон, и кладка нагреваются в основном от металла (рис. 4.2 а). В этом случае температура шлака на значительном расстоянии от электрических дуг меньше температуры металла, а температура кладки меньше температуры и шлака и металла [67].

2. При незначительном экранировании электрической дуги ванна нагревается теплом, поступающим от горячих зон, и отражаемым кладкой на шлак, от которого нагревается металл (рис. 4.2 б). При такой схеме тепловых потоков температура кладки выше температуры шлака, а температура шлака выше температуры металла [67].

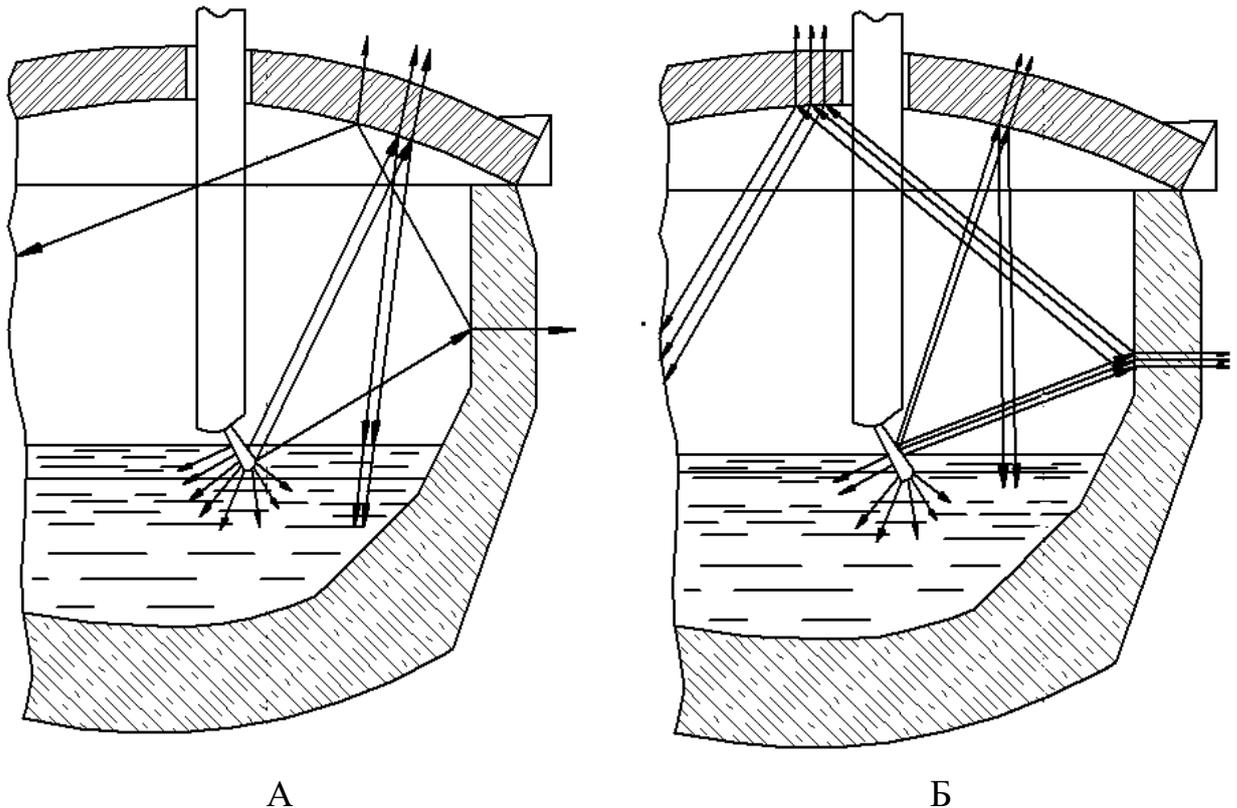


Рисунок 4.2 - Схема теплообмена в дуговых электропечах при сильном (а) и слабом (б) экранировании электрических дуг

Первая схема теплообмена исключает опасность перегрева футеровки, но менее благоприятна для протекания физико-химических процессов между шлаком и металлом. При такой схеме теплообмена отдельные участки поверхности раздела металл-шлак неравноценны для процессов рафинирования: условия рафинирования благоприятны в горячей зоне (шлак горячее металла) и неблагоприятны на периферии (шлак холоднее металла) [67].

Вторая схема обеспечивает более благоприятные условия рафинирования металла шлаком по всей поверхности ванны, но создает опасность перегрева отдельных участков футеровки [67].

4.2 Методики расчета теплообмена в свободном пространстве дуговых печей

Как показал анализ научно технической литературы [56-58, 854-105], вопросом изучения процессов теплообмена в рабочем пространстве ДСП уделяется большое внимание. Первые работы по изучению теплообмена появились в конце 30-х – начале 40-х годов двадцатого века.

В этот период американским ученым В. Пашкисом были проведены исследования, в результате которых было установлено, что в мощной электрической дуге 85-90 % всей мощности выделяется столбом электрической дуги, а остальные 10-15 % - торцом электрода.

Мощность в печной электрической дуге сконцентрирована в относительно небольшом объеме, исходя из этого, в 1940-х годах Н. В. Огороков предложил рассматривать электрические дуги как точечные источники излучения, а для расчета плотности потоков излучения электрической дуги использовать формулу Кеплера, которая с поправками Н. В. Огорокова приняла следующий вид [48, 53]:

$$q_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д}} \cos \varphi_i}{4\pi r_i^2} \quad (4.2)$$

где φ_i - угол между нормалью к расчетной площадке и направлением

излучения, град; r_i - расстояние от расчетной площадки до электрической дуги, м.

Для определения плотностей потоков излучений, падающих на поверхности ДСП, Н.В. Окорочков были выведены из выражения (4.2) следующие формулы:

- для расчета плотности потока излучения на расплав от электродных пятен:

$$q_{э.п} = \frac{0,1P_D \cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi^2 r_i^2} \quad (4.3)$$

где φ_1, φ_2 , - определяются из геометрических построений, град.

- для расчета плотности потока излучения от электрической дуги на металл:

$$q_D = \frac{0,9P_D h_2}{4\pi(h_2^2 + r_i^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.4)$$

где h_2 - половина высоты графитированного электрода над расплавом (положение центра излучающей сферы), м.

При расчете тепловых потоков по вышеуказанным формулам, расстояния до расчетных точек во много раз больше длины электрической дуги, в связи с чем Н.В. Окорочков вводит допущение о электрической дуге как о точечном источнике излучения. В приведенных автором исследованиях [55, 48], показано что, при расстояниях, превышающих длину электрической дуги в 5 раз, последнюю можно принять за источник излучения бесконечно малых размеров.

Электрические дуги имеет геометрическую форму, приближенную к цилиндрической. Это было доказано многими исследователями [47, 56-58, 84] при проведении фото- и киносъемки электрической дуги. Поэтому Н. В. Окорочков в своих аналитических рассуждениях, изображая электрическую дугу цилиндром, ошибочно использует допущение об электрической дуге как об источнике бесконечно малого размера сферической формы.

При появлении дуговых печей сверхвысокой мощности было замечено, что по формуле (4.2) и другим, выведенным из (4.2), получается далеко не соответствующая реальным процессам модель теплообмена, так как при разных электрических режимах (различных токах I_D и напряжениях U_D), и одинаковой

суммарной мощности электрических дуг, ДСП будет иметь разные показатели стойкости футеровки.

Г. М. Палием были усовершенствованы методики расчета плотностей потоков излучений от электрических дуг Н.В. Огорокова и выведены функции распределения падающих потоков излучений на поверхность футеровки [37, 48]:

$$q_D = \frac{1}{4\pi r_n^2} \sum \frac{P_d(1 - k_p \cos \varphi_i)}{\left[1 + k_p^2 - 2k_p \cos \varphi_i + \left(\frac{H_{ст} - h}{r_{p.э.}}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (4.5)$$

где $H_{ст}$ - текущая высота стен печи; $k_p = r_p/r_n$ - коэффициент, учитывающий размещение электродов; r_n - радиус ванны на уровне поверхности жидкого металла; $\cos \varphi_i$ - направляющий косинус для соответствующей электрической дуги; $r_{p.э.}$ - радиус распада электродов.

В формулу Н.В. Огорокова в 70-е годы был добавлен коэффициент, позволяющий учитывать экранирование электрической дуги торцом электрода, после чего выражение (4.2) приняла следующий вид:

$$q_D = K_э \frac{P_d \cos \varphi}{4\pi r_i^2} \quad (4.6)$$

где $K_э$ - коэффициент экранирования электрической дуги торцом электрода, металлом и шлаком.

Коэффициент экранирования в инженерных расчетах обычно опускали, так как его определение представляет большие трудности.

Сотрудниками ВНИИЭТО в середине 1970-х годов на ДСП-200 в условиях завода "Красный Октябрь" были выполнены экспериментальные исследования по разделению конвективной и лучистой составляющих теплового потока [37, 48]. Полученные результаты подтвердили выводы Н.В. Огорокова и В. Пашкиса о доминирующей теплоотдаче излучением от электрических дуг при выплавке стали.

Экспериментально было установлено, что падающие на свод и стены суммарные тепловые потоки, состоят из потоков излучений на 85-95 %. Исходя из этого, было подтверждено то, что основным видом теплопередачи в ДСП является радиационный теплообмен.

И.И. Игнатов в это же время вел работу по разработке математической модели для расчета теплообмена в дуговой печи. И.И. Игнатов основываясь на дифференциальные уравнения теплообмена, разработал численные методы расчета теплообмена в шихте. Система уравнений, выведенная для расчета теплообмена в двумерном приближении, имеет следующий вид [48, 86]:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_m \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m^z \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_m^r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) + q_l - q_{m\Gamma} + q_{vd} \\ c_\Gamma \rho_\Gamma \left(\frac{\partial T_\Gamma}{\partial t} + W_z \frac{\partial T_\Gamma}{\partial z} + W_R \frac{\partial T_\Gamma}{\partial r} \right) = q_{m\Gamma} + q_{\Gamma B} \\ \frac{\partial(\rho_\Gamma W_z)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho_\mu r W_R) = 0 \\ \rho_\Gamma \left(W_z \frac{\partial T_\Gamma}{\partial z} + W_z \frac{\partial T_\Gamma}{\partial r} \right) + \frac{\partial(\rho_\Gamma R T_\Gamma)}{\partial z} + \frac{\xi}{2} W_\Gamma \sqrt{W_z^2 + W_R^2} + \rho_\Gamma g = 0 \\ \rho_\Gamma \left(W_z \frac{\partial T_\Gamma}{\partial z} + W_R \frac{\partial T_\Gamma}{\partial r} \right) + \frac{\partial(\rho_\Gamma R T_\Gamma)}{\partial r} + \frac{\xi}{2} W_R \sqrt{W_z^2 + W_R^2} = 0 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

где c_m – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К); ρ_m – плотность металла, кг/м³; T_m – температура металла, К; λ_m – теплоемкость металла, Дж/(кг·К); c_Γ – теплоемкость газа, Дж/(кг·К); ρ_Γ – плотность газа проходящего через шихту (металл), кг/м³; T_Γ – температура газа, К; q_l , $q_{m\Gamma}$ – объемная плотность потока излучения и потока между фазами системы металл – газ, Дж/м³; $q_{m\Gamma}$, $q_{\Gamma B}$ – объемная плотность внутренних источников тепла соответственно в металле и газе, Дж/м³; W – скорость газа, м/с; ξ – внешние силы, Н.

Решая дифференциальные уравнения теплообмена (4.7) на ЭВМ применяли следующие допущения:

- мощность выделяется не под каждой электрической дугой, а в некоторой кольцевой зоне и равномерно распределяется в ее объеме;
- внутренние источники тепла от химических реакций распределяются по всему объему и начинают действовать при заданной температуре;
- внутренние источники образования газа заменяются притоком газа с энтальпией, получаемой в результате окисления углерода при расплавлении.

По предложенной И.И. Игнатовым методике процесс теплообмена в дуговых печах для открытого периода плавки стали описывается системой интегральных уравнений:

$$E_{эф}(M, \tau) = E_{соб}(M, \tau) + \left[1 - \Sigma(M, \tau) \right] \int k_{MP}(M, P) E_{эф}(P, \tau) dP \quad (4.8)$$

где $E_{соб}(M, \tau)$, $E_{эф}(M, \tau)$ – собственное и эффективное излучение в точке M ; $\Sigma(M, \tau)$ – поглощательная способность в точке M ; P – текущая точка поверхности; τ – время, с; $k_{MP}(M, P) = \cos\varphi_M \cos\varphi_P / \pi r_{MP}^2$; φ_M , φ_P – углы между нормальными к поверхности S в точках M и P и направлением MP ; r_{MP} – длина отрезка MP , м; $E_{эф}(P, \tau)$ – эффективное излучение в точке P .

При расчете данной модели производили разбиение всех поверхностей, участвующих в теплообмене, на отдельные участки. На ЭВМ БЭСМ-6 в виде процедур и программ реализована описанная модель. В течение нескольких лет данная модель модернизировалась и совершенствовалась [48, 86].

А.Н. Макаров и А.Д. Свенчанский в 80-х годах разрабатывают методику позволяющую определить тепловые потоки излучаемые электрической дугой (рис. 4.3), которая учитывает и заглубление электрической дуги в шлак и металл [48, 87-91]. Электрическая дуга здесь рассматривалась как элементарный цилиндр и тепловой поток определяется по выражению:

$$q_d = \frac{0,9P_d \cos \alpha \cos \beta \cdot l_{отк}}{\pi^2 r_i^2 l_d} \quad (4.9)$$

где P_d – мощность электрической дуги, кВт; $l_{отк}$ – часть электрической дуги, свободно излучающая в пространство, м; l_d – длина электрической дуги, м; r –

расстояние от электрической дуги до точки на стене, м; α - угол между нормалью к оси электрической дуги и направлением излучения, град; β – угол между направлением излучения и нормалью к элементарной площадке свода, град.

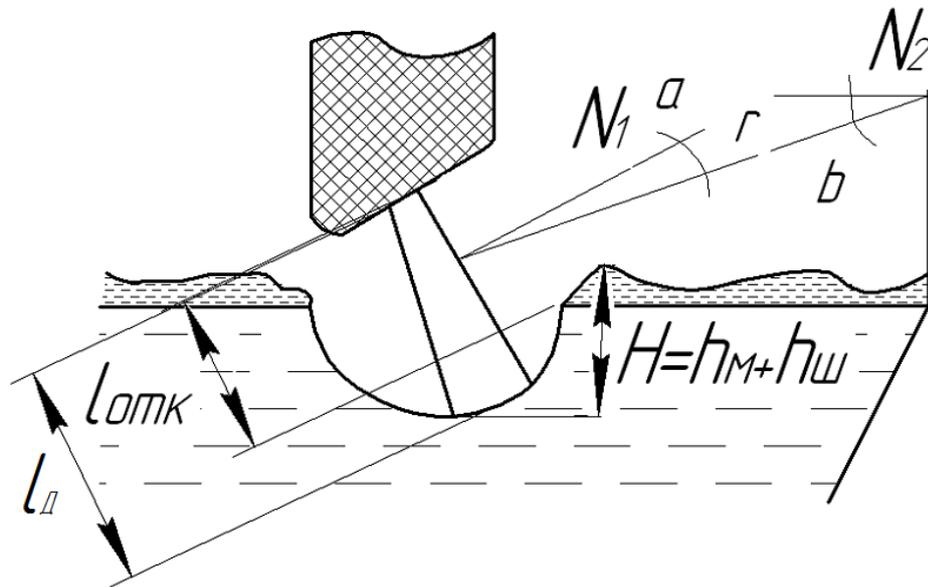


Рисунок 4.3 - Геометрические построения для расчета плотности потока излучения по А.Н. Макарову

Расчет заглибления электрической дуги в металл и шлак авторы предложили осуществлять следующим образом: высота шлака $h_{ш}$, а также занимаемый жидким шлаком объем $V_{ш}$ (m^3), определяются по следующим формулам:

$$h_{ш} = 4V_{ш} / \pi D_M^2 \quad (4.10)$$

$$V_{ш} = k m_{ж} v_{ш} \quad (4.11)$$

где D_M - диаметр зеркала ванны, м; $k_{ш}$ - кратность шлака, $k_{ш} = 0,075$ [48]; $m_{ж}$ - масса жидкого металла, т; $v_{ш}$ - удельный объем жидкого шлака, $v_{ш} = 0,312 m^3/т$.

В сверхвысокомощных дуговых печах приближение электрической дуги как линейного и тем более точечного источника излучения становится недостаточно корректным, так как возрастает длина электрической дуги и её поперечное сечение. О.А. Казаков и Р.А. Просвирникова в конце 80-х годов на основании вышеизложенных фактов разрабатывают математические модели электрической

дуги [48, 91-94]: как оптически тонкого тела (ОТТ) - объемный источник; как оптически плотного тела (ОПТ) - поверхностный источник. В первом случае плотность потока излучения представляется объёмным интегралом:

$$q_{d1} = \iiint_V \frac{P_\delta}{4\pi l_\delta} \frac{1}{\pi r_0^2} \frac{|\cos \alpha|}{|\vec{r}|^2} dV \quad (4.12)$$

Во втором – поверхностным:

$$q_{d2} = \iint_S \frac{P_\delta}{2\pi^2 l_\delta r_0} \frac{|\cos \alpha| |\cos \beta|}{|\vec{r}|^2} dS \quad (4.13)$$

где $dV = r dr dh d\varphi$ - элемент объема источника, $dS = r dh d\varphi$ - элемент площади излучающей поверхности.

Для расчета модели электрической дуги как источника излучения, приняты следующие допущения: равномерное распределение мощности излучения по поверхности источника или объёму, ось источника расположена перпендикулярно поверхности расплава и параллельно оси симметрии поверхностей облучаемых электрической дугой.

В случае если радиус электрической дуги (источника излучения) очень мал модель сводится к линейной. Для ОТТ столб электрической дуги является линейным источником, все элементы которого излучают как точечные источники:

$$q_{d3} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{P_\delta}{4\pi l} \frac{|\cos \alpha|}{|\vec{r}|^2} dz \quad (4.14)$$

а для ОПТ электрическая дуга является линейным источником:

$$q_{d4} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{P_\delta}{\pi^2 l_\delta} \frac{|\cos \alpha| |\cos \beta|}{|\vec{r}|^2} dz \quad (4.15)$$

где z_{min} z_{max} - соответствующий начальный и конечный пределы интегрирования по длине источника излучения, обусловленные экранированием.

С целью уменьшения продолжительности вычисления на ЭВМ распределения потоков излучения на цилиндрические, плоские, сферические и конические элементы поверхностей, поверхностный и объёмный интегралы О.А. Казаков и Р.Л. Просвирникова свели к определённым интегралам, а для линейных моделей электрической дуги получили аналитические выражения.

Джонс Алексис и Марко Рамирез разработали систему двухмерных уравнений в цилиндрических координатах [48, 96, 97] для моделирования теплообмена в дуговой печи, включающую:

- уравнение сплошности:

$$\frac{\partial(\rho_{\text{эд}}v)}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}r_i\omega)}{\partial r_i} = 0 \quad (4.16)$$

- уравнения движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}v^2)}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}r_i v\omega)}{\partial r_i} = & -\frac{\partial P}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial v}{\partial r_i} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) \right) + J_r B_\theta \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}v\omega)}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}r_i v\omega^2)}{\partial r_i} = \\ = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r_i} \right) \right) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) - \mu_{\text{eff}} \frac{2v}{r_i^2} - J_r B_\theta \end{aligned} \quad (4.18)$$

- уравнение энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}v\Delta H)}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial(\rho_{\text{эд}}r_i v\Delta H)}{\partial r_i} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_T} \frac{\partial \Delta H}{\partial z} \right) + \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_T} \frac{\partial \Delta H}{\partial r_i} \right) + \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma_c} - \\ & - S_R - \frac{5 k_b}{2 e} \left(\frac{J_r}{C_p} \frac{\partial \Delta H}{\partial r_i} + \frac{J_z}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.19)$$

- уравнение турбулентного переноса энергии:

$$\frac{\partial(\rho_{эд}vE_k)}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial(\rho_{эд}r_i\omega E_k)}{\partial r_i} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_R} \frac{\partial E_k}{\partial z} \right) + \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_K} \frac{\partial E_k}{\partial r_i} \right) + G - P\varepsilon \quad (4.20)$$

- уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{эд}v\varepsilon)}{\partial z} + \frac{1}{r_i} \frac{\partial(\rho_{эд}r_i\omega\varepsilon)}{\partial r_i} = \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_c} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{1}{r_i} \frac{\partial}{\partial r_i} \left(r_i \frac{\mu_{eff}}{\sigma_c} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r_i} \right) + \frac{\varepsilon}{E_k} (C_1 G - C_2 P\varepsilon) \end{aligned} \quad (4.21)$$

- уравнение объемного образования турбулентной кинетической энергии:

$$G = \mu_{eff} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{r_i} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial r_i} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (4.22)$$

где $\rho_{эд}$ - плотность плазмы электрической дуги, Вт/м²; z - расстояние вдоль оси, м; ω и v - осевая и радиальная скорости соответственно, 1/с; M_{eff} - эффективная динамическая вязкость, Па·с; J_r - плотность тока в радиальном направлении, А/м²; ΔH - энтальпия, Дж/моль; B_θ - плотность магнитного потока, Вб; $J_r B_\theta$ - осевая составляющая силы Лоренца; J_z - плотность тока вдоль оси, А/м²; $J_z B_\theta$ - радиальная составляющая силы Лоренца; σ_T - теплопроводность, Вт/(м·К); C_p - изобарная теплоёмкость, Дж/К; σ_e - электропроводность, Ом; S_R - излучение в радиальном направлении; k_b - постоянная Больцмана ($1,380\ 6488(13) \cdot 10^{-23}$), Дж·К⁻¹; e - заряд электрона ($1.60217657 \times 10^{-19}$), Кл; E_k - турбулентная кинетическая энергия, Дж; ε - скорость рассеивания турбулентной кинетической энергии; G - объёмные источники энергии; σ_k - постоянная; $\sigma_\varepsilon, C_1, C_2$ - константы.

Поток тепловой энергии, излучаемый электрической дугой на поверхность расплава, в данной методике определяется следующим выражением:

$$Q_r = \sum \frac{S_{R,j}}{4\pi d_{ij}^2} \cos \psi_i \Delta V_j \quad (4.23)$$

где S_{Rj} - излучение элементарного объёма столба электрической дуги на поверхность металла i ; ΔV_j - элементарный объём, м³; d_{ij} - расстояние между поверхностью i и объёмом j ; ψ - угол между d и нормалью к поверхности i .

Эта методика громоздка и излишне усложнена, и подходит лишь для моделирования частных случаев теплообмена в ДСП. Например, для решения данной системы уравнений с двухмерной решёткой из 2025 ячеек на сервере Sun Ultra Enterprise 4000 потребовалось 4 часа.

Из ряда исследований выполненных эмпирическим путем - важно отметить работы Монтгомери Р.В. [48, 104] и Б. Баумена [98-103].

Монтгомери Р.В. в своих исследованиях производил замеры плотности тепловых потоков в ДСП при помощи переносных калориметров, основываясь на полученные данные, вывел следующую формулу:

$$q_d = 1,33 \cdot \frac{I_d(U_d - 105)}{e^{3,3l_k} - 1} \quad (4.24)$$

где l_k - расстояние от электрической дуги до калориметра, м.

Используя коллимирующий прибор с термодетектором, измерили собственное излучение электрической дуги. В результате чего была выведена формула, позволяющая оценить плотность излучения:

$$q_d = 4,81 \cdot 10^{-4} I_d (U_d - 80) \quad (4.25)$$

Используя выведенные формулы для различных условий горения электрической дуги выполнен расчет плотности тепловых потоков и тепловых нагрузок в горячих точках печи, имеющей характеристики, схожие с установкой, на которой Монтгомери экспериментально получил величину плотности потоков равную 65 кВт/м².

На фоновое излучение в ДСП накладывалось данное излучение, после чего производилась фиксация суммарного теплового потока калориметром. Однако полученные Монтгомери уравнения, не применимы к крупнотоннажным дуговым печам.

3. Гузовичем [48, 105] была разработана математическая модель, основанная на решении основных законов теплообмена излучением, которая дает возможность рассчитать результирующие тепловые потоки: от электрода на свод

и стены; от электрической дуги на свод и стены; от расплава на свод и стены; 4) от газов на свод и стены.

По следующей формуле определяется количество тепла Q_{1-2} , передаваемого от поверхности S_1 , имеющую температуру T_1 , к поверхности S_2 , имеющую температуру T_2 :

$$Q_{1-2} = c\varepsilon_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-2} S_1 \quad (4.26)$$

где $c = 5,67$ - излучательная способность абсолютно чёрного тела, Вт/м²К⁴; ε_{1-2} - приведенная степень черноты; φ_{1-2} - угловой коэффициент излучения.

Тепловой поток от газов на поверхности рассчитывается по следующему выражению:

$$Q_{g-p} = \varepsilon_p c \left[\varepsilon_g \left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - a_g \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right] \quad (4.27)$$

где T_g - температура газа, К; T_p - температура поверхности, К; ε_p - степень черноты поверхности; ε_g, a_g - излучательные и поглощательные способности газов.

Анализ выше описанных методик позволяет сказать, что при всех своих достоинствах и недостатках, наиболее простой и в тоже время достаточно точной является методика, разработанная А.Н. Макаровым и А.Д. Свенчанским, которая позволяет без усложнения алгоритма расчета выполнить анализ эффективности тепловой работы ДСП при применении трубчатых электродов в сравнении с сплошными электродами.

4.3 Разработка математической модели теплообмена в ДСП от электрических дуг

Для анализа эффективности тепловой работы ДСП необходимо в первую очередь иметь сведения о характере распределения плотности тепловых потоков по поверхности ванны металла.

Основным источником теплогенерации в ДСП является электрическая дуга. Сравнительные исследования и анализ литературных данных показали, что характер электрической дуги от сплошного электрода и от трубчатого отличается {глава 1}. Для электрической дуги, горящей от сплошного электрода, характер распределения тепловых потоков в рабочем пространстве дуговой печи известен, чего нельзя сказать о характере теплообмена при работе ДСП с использованием трубчатых электродов.

В связи с этим была разработана математическая модель, описывающая процесс теплообмена излучения в системах: электрическая дуга – газ – металл, электрическая дуга – газ – стены, электрическая дуга – газ – свод.

В основу математической модели положены современные научные достижения в области расчета сложного радиационного теплообмена в замкнутом объеме и экспериментальные разработки по совершенствованию энерготехнологических режимов электроплавки стали.

При достаточно полном описании физических явлений и процессов вполне применимо использование метода математического моделирования, для решения задач расчета распределения тепловых потоков излучения в рабочем пространстве ДСП. Возможность быстро рассмотреть необходимое количество вариантов ситуаций в рабочем пространстве ДСП и энерготехнологических режимов является важной особенностью данного метода. Основой математической модели является излучение в системах: электрическая дуга – газ – металл, электрическая дуга – газ – стены, электрическая дуга – газ – свод. Вышеуказанные системы подразумевают разбиение объемов и поверхностей, принимающих участие в теплообмене, на элементарные объемы и площадки. Это деление является конечным и вместе с допущениями, принятыми при составлении модели и программы, определяют степень приближения модели к реальной печи.

Основными допущениями при разработке математической модели были:

- 1) форма печи упрощена и была принята цилиндрической;

- 2) распределение мощности по фазам симметричное;
- 3) электрическая дуга в сталеплавильных печах представляют собой излучающий канал цилиндрической формы;
- 4) по всей высоте цилиндра температура оси электрической дуги одинакова;
- 5) теплоотдача осуществляется преимущественно излучением;
- 6) электрическая дуга излучает как абсолютно чёрное тело, т.е. поверхностью;
- 7) рассматривалось установившееся тепловое состояние печи [106];
- 8) радиус зеркала металла принят равным внутреннему радиусу печи [105];
- 9) среда рабочего пространства лучепрозрачная [106];
- 10) поток, падающий от электрической дуги на стены и свод печи поглощается полностью.

Для расчета по математической модели были выбраны следующие электрические параметры:

Степень напряжения.....	4
Вторичное фазное напряжение, В.....	225
Ток электрической дуги, кА.....	8,22
Индуктивное эксплуатационное сопротивление печной установки, Ом.....	0,0034
Активное сопротивление, Ом.....	0,0004

Для выполнения расчета все поверхности, на которые необходимо рассчитать тепловой поток от электрической дуги, были разбиты на ячейки. Поверхность ванны металла и свода были разбиты на 40 колец шириной 27,5 мм и 36 секторов, схема разбиения представлена на рисунке 4.4.

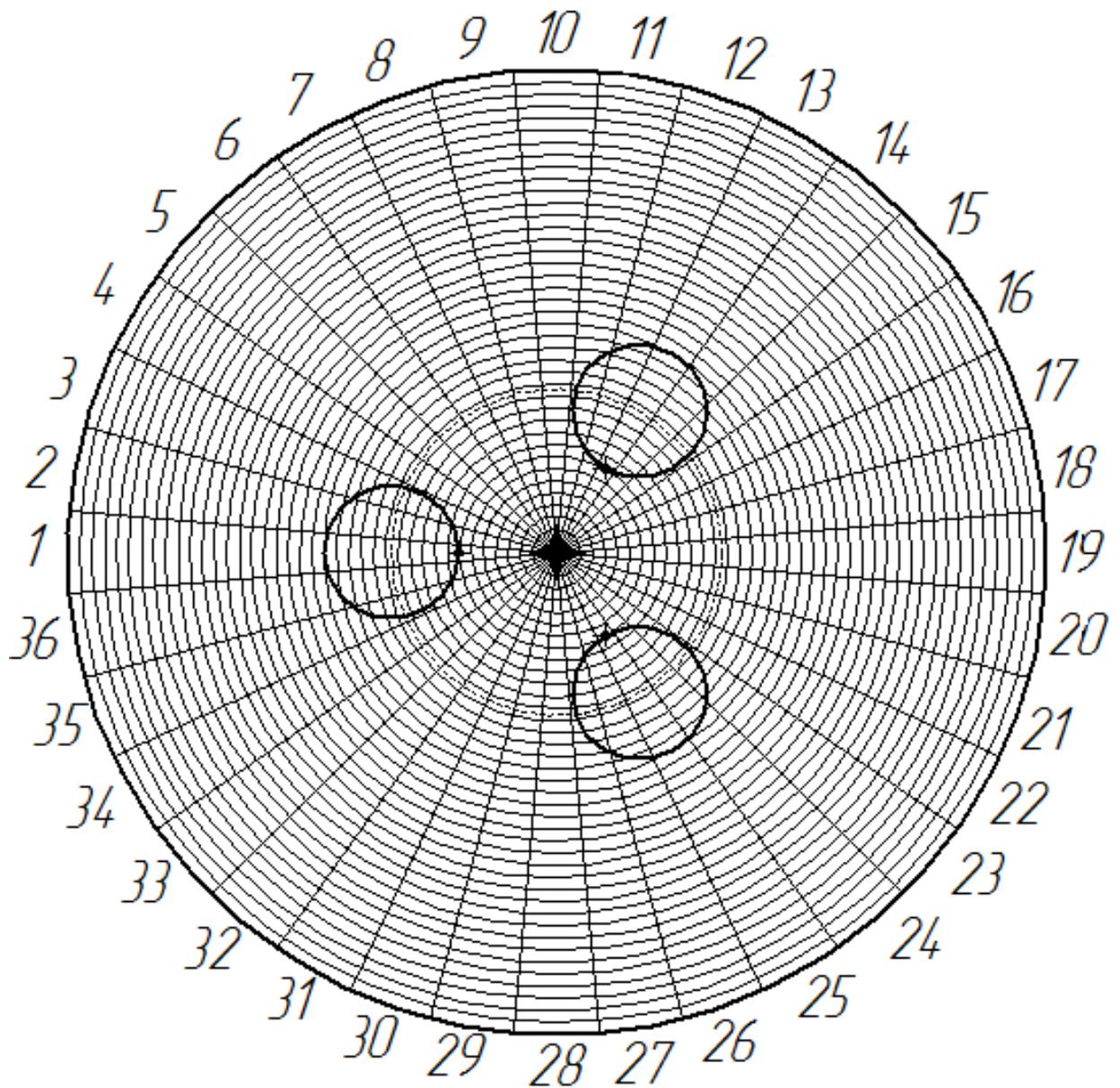


Рисунок 4.4 - Деление поверхности ванны металла на элементарные ячейки

Для разбиения поверхности стен будем использовать уже имеющееся деление печи на сектора (36 секторов), а по высоте произведем разбиение на 30 поясов высотой 38,6 мм (рис.4.5).

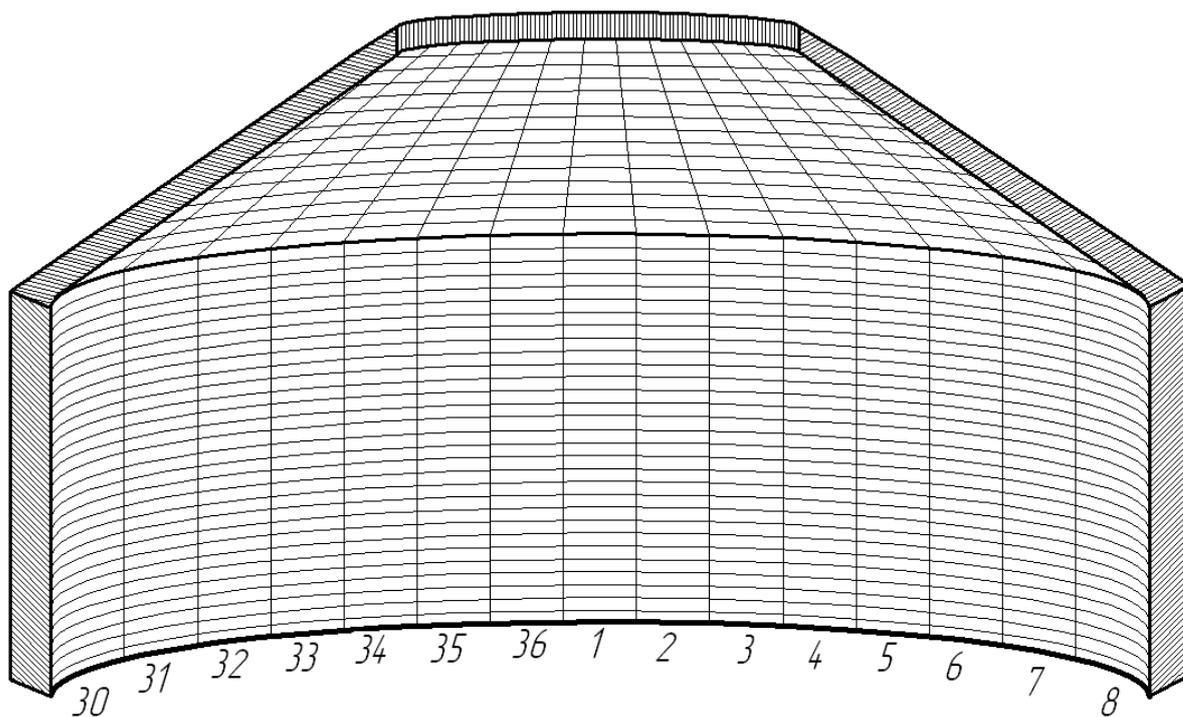


Рисунок 4.5 - Деление поверхности стен и свода на элементарные ячейки

До начала расчета по математической модели произведем расчет площади элементарных ячеек и расстояний от электрической дуги до центров элементарных ячеек.

Площади площадок разбитых на ванне и своде печи одного и того же кольца, одинаковы и будут определяться по формуле:

$$F_k = \frac{\pi[(m \cdot k)^2 - [m(k-1)]^2]}{36} \quad (4.28)$$

где k – номер кольца; m - ширина кольца, м.

Площади площадок стен одинаковы и рассчитываются по формуле:

$$F = h_n l_c \quad (4.29)$$

где h_n - высота пояса, м; l_c - длина сектора, м.

Для определения расстояний от электрической дуги до центров ячеек и выполнения дальнейших расчетов проведем оси координат в центре ванны. Ось OX – проведем так, чтобы она прошла через середину элементарных площадок

1-го, 19-го сектора и горизонтальную ось одного из электродов. Ось OY – координата по вертикали от центра площадки (рис. 4.6).

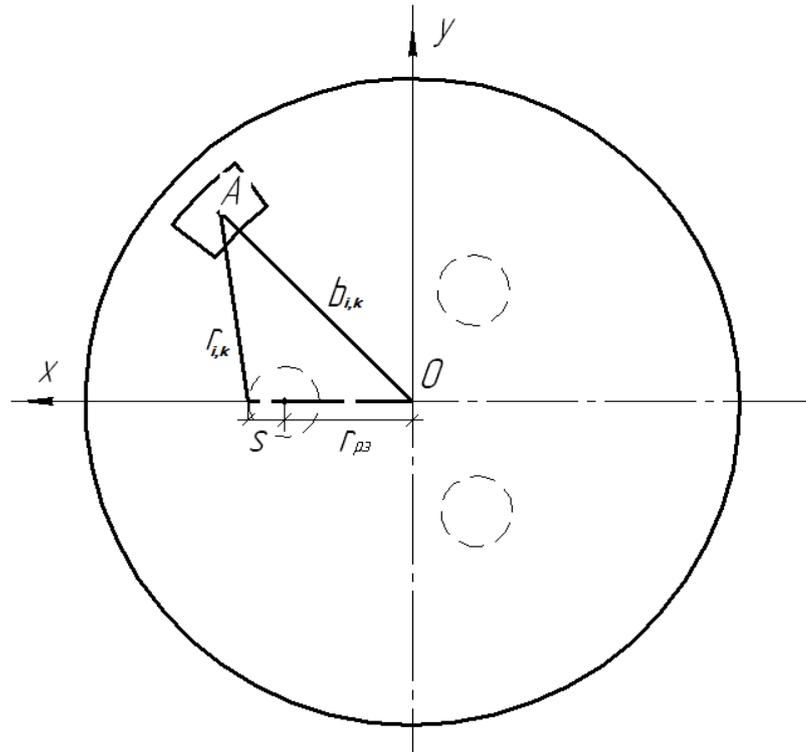


Рисунок 4.6 - Схема расчета расстояний от центров ячеек до электрической дуги

В первую очередь найдем координаты центров элементарных ячеек. Ось абсцисс (Ox):

- для 1-го и 19-го сектора:

$$x_{i,k} = r_{яч} + s_{яч}(k-1) \quad (4.30)$$

- для секторов со 2-го по 18-й:

$$x_{i,k} = r_{яч} * \cos \alpha_i + s_{яч} * \cos \alpha_i * (k-1) \quad (4.31)$$

Ось ординат (Oy):

- в 1 и 19 $y_{i,k} = 0$;

- со 2-го по 18-й сектор:

$$y_{i,k} = r_{яч} * \sin \alpha_i + s_{яч} * \sin \alpha_i * (k-1) \quad (4.32)$$

где $s_{яч}$ – ширина элементарной ячейки, м; $r_{яч}$ – расстояние от центра печи до

центра элементарной площадки первого кольца, м; α_i - угол поворота сектора относительно оси x, рад; i – номер сектора.

В ходе расчета для определения угла отклонения электрической дуги от оси электрода использовалась полученная зависимость (2.24).

Для дальнейших расчетов найдем проекцию длины электрической дуги на ось x:

$$s = l_D \cdot \sin(\varphi) \quad (4.33)$$

φ - угол отклонения электрической дуги от оси электрода, рад.

Расстояния от центра печи до центров элементарных площадок: для 1-го и 19-го сектора равны x , а со 2-го по 18-й сектор вычисляются по формуле, выведенной из теоремы Пифагора:

$$b_{i,k} = \sqrt{x_{i,k}^2 + y_{i,k}^2} \quad (4.34)$$

Далее необходимо найти расстояния от электрической дуги до центров элементарных ячеек.

Для ячеек 1-го сектора:

- которые находятся справа от пятна контакта электрической дуги с расплавом:

$$r_{i,k} = s + r_{p.э} - x_{i,k} \quad (4.35)$$

- которые находятся слева от пятна контакта электрической дуги с ванной металла:

$$r_{i,k} = x_{i,k} - (s + r_{p.э}) \quad (4.36)$$

Используя теорему косинусов, найдем расстояние в секторах со 2-го по 18-й по формуле:

$$r_{i,k} = \sqrt{b_{i,k}^2 + (r_{p.э} + s)^2 - 2 \cdot b_{i,k} \cdot (r_{p.э} + s) \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.37)$$

Для определения расстояний в 19-м секторе применим формулу:

$$r_{i,k} = (s + r_{p.э}) + x_{i,k} \quad (4.38)$$

где $r_{p.э}$ - радиус распада электрода, м.

Математическая модель расчета тепловых потоков включает в себя систему уравнений, описывающих процесс теплообмена в ДСП.

Мощность, выделяемую электрической дугой, можно определить из выражения:

$$P_D = U_D \cdot I_D \quad (4.39)$$

где $U_D = (U_{2\phi} - (I_D \cdot X)^2)^{0.5} - I_D \cdot R$ – напряжение на электрической дуге, В; $U_{2\phi}$ – вторичное фазное напряжение, В; X – индуктивное эксплуатационное сопротивление печной установки, Ом; R – активное сопротивление, Ом; I_D – ток электрической дуги, А.

Длина электрической дуги:

$$l_D = U_D - U_{a-k} / B_v \quad (4.40)$$

где B_v – градиент напряжения в электрической дуге (800-12000 В/м, в зависимости от периода плавки); U_{a-k} – анодно-катодное падение напряжения.

Эффективный радиус столба электрической дуги можно определить как:

$$d_D = \frac{P_D}{C_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \cdot \pi \cdot l_D} \quad (4.41)$$

где $C_s = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана; T_D – температура электрической дуги, вычисляется по уравнению Штейбека и Энгеля при условии чёрного излучения $T_D = 800 U_i$; U_i – потенциал ионизации дугового газа.

Величину плотности теплового потока, падающего в любую точку поверхности металла от электрической дуги – элементарного излучающего цилиндра, можно определить по выражению:

$$dq = \alpha_D \cdot P_D \cdot d\varphi_{ik} \quad (4.42)$$

где α_D – коэффициент излучения электрической дуги равный 0,8; $d\varphi_{ik}$ – элементарный угловой коэффициент излучения.

Для того чтобы рассчитать плотность теплового потока излучением от

электрической дуги на площадки, расположенные на поверхности металла, необходимо знать локальные угловые коэффициенты $d\varphi_{ik}$.

Для вычисления угловых коэффициентов применили следующие допущения:

- 1) локальный угловой коэффициент равен среднему;
- 2) нормаль, находящаяся в центре каждой зоны, не изменяет своего направления в пределах этой зоны;
- 3) температура и энергетические характеристики излучения приняты постоянными в пределах каждого элементарного участка [35].

Для того чтобы определить локальные угловые коэффициенты излучения на поверхности элементарных площадок ванны, которые находятся на горизонтальной плоскости от линейного источника, расположенного под углом $(90 - \varphi)$ градусов к горизонтальной плоскости, необходимо выполнить геометрические построения, показанные на рисунке 4.7.

Выделим на источнике излучения (электрической дуге), представляющем собой цилиндр бесконечно малого диаметра длиной l_D , элемент dl_D , то есть цилиндр бесконечно малого диаметра и бесконечно малой высоты. Известно, что элементарный угловой коэффициент излучения $d\varphi_{ik}$ с поверхности элементарного цилиндра на поверхность элементарной площадки рассчитывается по формуле [84]:

$$d\varphi_{ik} = \frac{\cos\alpha_i \cdot \cos\beta_i F_{ik} dl_D}{\pi^2 l_i^2 l_D} \quad (4.43)$$

где α_i – угол между нормалью N к оси элементарного цилиндра и направлением излучения, град; β_i – угол между нормалью N_2 к центру элементарной площадки и направлением излучения, град; $F_{i,k}$ – площадь поверхности элементарной площадки, m^2 ; l_i – расстояние от элементарного цилиндра до элементарной площадки, м.

Обозначим через φ угол между осью линейного источника OO_1 и нормалью

к горизонтальной поверхности, центр элементарной площадки буквой A , расстояние от точки A до точки пересечения оси линейного источника с горизонтальной плоскостью через $r_{i,k}$. Линейный источник излучает в точку A в пределах угла β . Построим прямоугольный треугольник ABC , один катет которого AB лежит на нормали $2N$ в расчетную точку A , второй – BC лежит на кратчайшем расстоянии от элемента dl_D до $2N$, гипотенузой является прямая AC , причем $AC = l_i$

Из построений видно, что угол между стороной треугольника CB и нормалью $N1$ к элементу источника dl равен φ , отрезок AO является стороной тупоугольного треугольника AOC , причем $AO = r_{i,k}$.

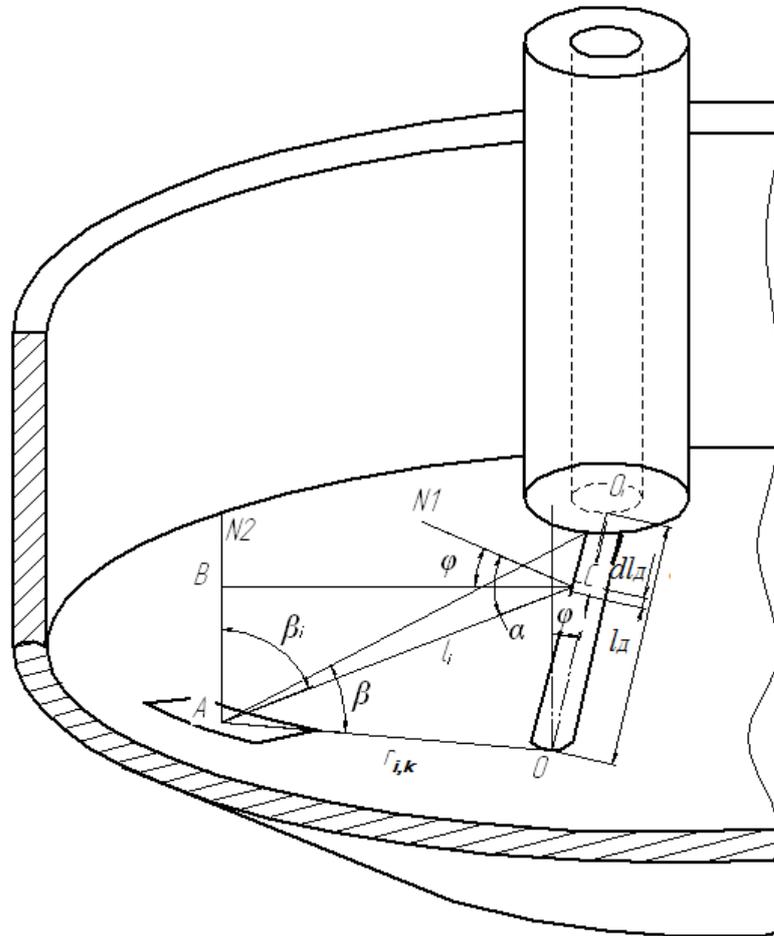


Рисунок 4.7 - Геометрические построения для расчета локального углового коэффициента излучения линейного источника на элементарную площадку, располагающуюся на плоскости, при взаимном пересечении линейного источника и плоскости (элементарная площадка находится с внешней стороны линейного источника)

На основе построений (рис. 4.7) получаем следующее выражение [83]:

$$\frac{l_i}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)} = \frac{r_{ik}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i\right)} \rightarrow l_i = \frac{r_{ik} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i\right)} \quad (4.44)$$

Подставив (4.44) в (4.43), получим следующее выражение:

$$d\varphi_{ik} = \frac{\sin(\alpha_i - \varphi) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_i\right) F_{ik} d\alpha}{\pi^2 r_{ik} l_{\mathcal{D}} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)} \quad (4.45)$$

Интегрируя выражение (4.45) в пределах изменения угла α от φ до $(\varphi + \beta_{i,k})$ определяются локальные угловые коэффициенты излучения линейного источника на поверхность элементарной площадки [84]:

$$\begin{aligned} \varphi_{ik} &= \int_{\varphi}^{\varphi + \beta} \frac{F_{ik} \sin(\alpha_i - \varphi) \sin(\pi/2 - \alpha_i) d\alpha}{\pi^2 r_{ik} \cdot l_{\mathcal{D}} \sin(\pi/2 + \varphi)} = \\ &= \frac{F_{ik}}{2\pi^2 r_{ik} l_{\mathcal{D}} \sin(\pi/2 + \varphi)} \left\{ \begin{array}{l} \cos\varphi [\sin^2(\varphi + \beta_{i,k}) - \sin^2\varphi] - \\ - \sin\varphi [\beta_{i,k} + \cos(2\varphi + \beta_{i,k}) \sin\beta_{i,k}] \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (4.46)$$

Тогда излучение электрической дуги на площадку, расположенную с внешней стороны от электрической дуги, с учетом $\sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = \cos\varphi$ определяется по формуле:

$$\begin{aligned} q_{ik} &= \frac{F_{ik} \cdot \alpha_{\mathcal{D}} \cdot P_{\mathcal{D}}}{2\pi^2 r_{ik} \cdot l_{\mathcal{D}}} \left[\left[\left(\sin\left(\beta_{i,k} + \left(502,6 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right) \right)^2 \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \sin\left(502,6 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right)^2 \right] \right] \\ &\quad - \tan\left(502,6 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right) \cdot (\beta_{i,k} + \sin\beta_{i,k}) \\ &\quad \cdot \cos\left(\beta_{i,k} + 2 \cdot \left(502,6 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{om\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (4.47)$$

Угол $\beta_{i,k}$ находили путем дополнительных геометрических построений. Для элементарных ячеек 1-го сектора использовали построения, представленные на рисунке 4.8.

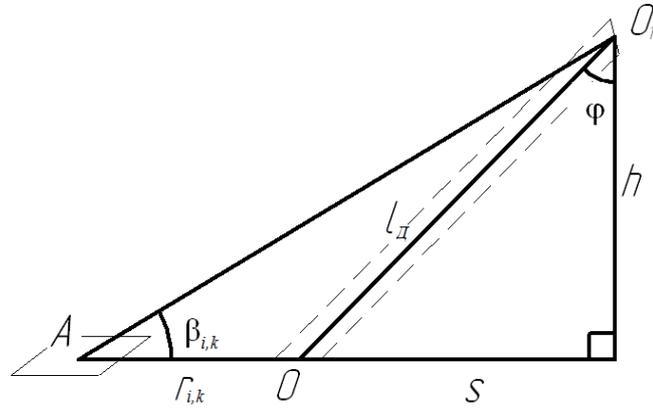


Рисунок 4.8 - Геометрические построения для нахождения угла $\beta_{i,k}$ в 1 секторе

Обозначим вертикальную проекцию длины электрической дуги через $h=l_D*\cos(\varphi)$. Тогда угол $\beta_{i,k}$ можно определить как:

$$\operatorname{tg}\beta_{i,k} = \frac{h}{r_{i,k} + s} \Rightarrow \beta_{i,k} = \operatorname{arctg}\left(\frac{h}{r_{i,k} + s}\right) \quad (4.48)$$

Для ячеек секторов со 2-го по 18-й применили построения, представленные на рисунке 4.9.

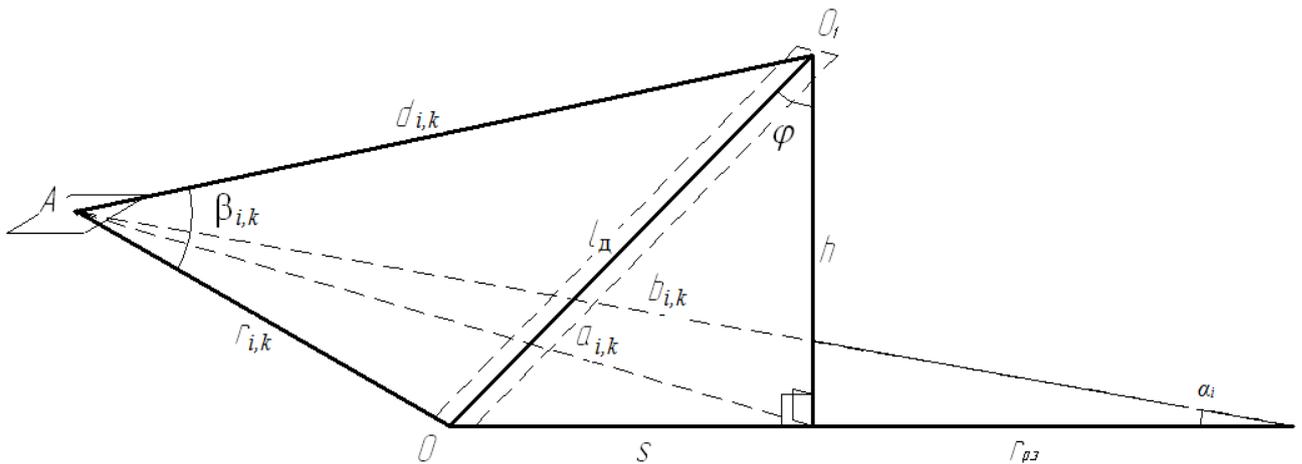


Рисунок 4.9 - Геометрические построения для нахождения угла β в секторах со 2-го по 18-й

Расстояние от пятна электрической дуги на электроде до элементарной площадки O_1A обозначим через $d_{i,k}$.

Для определения угла $\beta_{i,k}$ применим теорему косинусов:

$$l_{Д}^2 = r_{i,k}^2 + d_{i,k}^2 - 2r_{i,k} \cdot d_{i,k} \cdot \cos \beta_{i,k} \Rightarrow \cos \beta_{i,k} = \frac{r_{i,k}^2 + d_{i,k}^2 - l_{Д}^2}{2 \cdot r_{i,k} \cdot d_{i,k}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta_{i,k} = \arctg \left(\frac{r_{i,k}^2 + d_{i,k}^2 - l_{Д}^2}{2 \cdot r_{i,k} \cdot d_{i,k}} \right) \quad (4.49)$$

Применив теорему Пифагора найдем величину:

$$d_{i,k} = \sqrt{a_{i,k}^2 + h^2} \quad (4.50)$$

Используя теорему косинусов, получим:

$$a_{i,k} = \sqrt{r_{p.э}^2 + b_{i,k}^2 - 2r_{p.э} \cdot b_{i,k} \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.51)$$

Далее определим локальный угловой коэффициент излучения линейного источника на элементарные площадки при их расположении в пересекающихся плоскостях и при расположении элементарной площадки с внутренней стороны линейного источника. Для выполнения расчета произведем геометрические построения (рис. 4.10).

Введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \angle N10A = \varphi; & \quad \angle OAO_1 = \beta_{i,k}; & \quad \angle N21AE = \beta_{i1}; \\ \angle N21AE' = \beta_{i2}; & \quad \angle N12EA = \alpha_{i1}; & \quad \angle N13E'A = \alpha_{i2}; \end{aligned}$$

Расстояние от точки А до точки О соприкосновения оси линейного источника с горизонтальной плоскостью, на которой находится элементарная площадка, равно r . Согласно построениям, представленным на рисунке 4.10, можно записать:

$$\begin{aligned} \angle AOO_1 = (\pi/2 - \varphi); & \quad \angle OEA = (\pi/2 + \alpha_{i1}); & \quad \angle OEA = (\pi/2 - \alpha_{i2}); \\ \angle AEN1 = (\varphi - \alpha_{i1}); & \quad \angle N13E'B = \varphi; & \quad \angle AE'B = (\varphi + \alpha_{i2}); \\ \angle AO'N14(\beta_{i,k} - \varphi). & & \end{aligned} \quad (4.52)$$

Применяя теорему синусов, запишем [83]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{l_i}{\sin(\frac{\pi}{2} + \varphi)} &= \frac{r_{ik}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_{i1})} \rightarrow l_i = \frac{r_{ik} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi)}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_{i1})} \\ \frac{l_i}{\sin(\frac{\pi}{2} + \varphi)} &= \frac{r_{ik}}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_{i2})} \rightarrow l_i = \frac{r_{ik} \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \varphi)}{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_{i2})} \end{aligned} \right\} \quad (4.53)$$

$$\cos\beta_{i1} = \sin(\varphi - \alpha_{i1}); \quad \cos\beta_{i2} = \sin(\varphi - \alpha_{i2});$$

$$dl_{i1} \cos\alpha_{i1} = l_{i1} d\alpha_{i1}; \quad dl_{i2} \cos\alpha_{i2} = l_{i2} d\alpha_{i2}$$

Подставим (4.53) в (4.43), получим следующее выражение для элементарной площадки:

$$d\varphi_{ik} = \frac{F_{ik} \sin(\varphi - \alpha_{i1}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i1}) d\alpha_{i1}}{\pi^2 r_{ik} l_D \sin(\pi/2 - \varphi)} + \frac{F_{ik} \sin(\varphi - \alpha_{i2}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i2}) d\alpha_{i2}}{\pi^2 r_{ik} l_D \sin(\pi/2 - \varphi)} \quad (4.54)$$

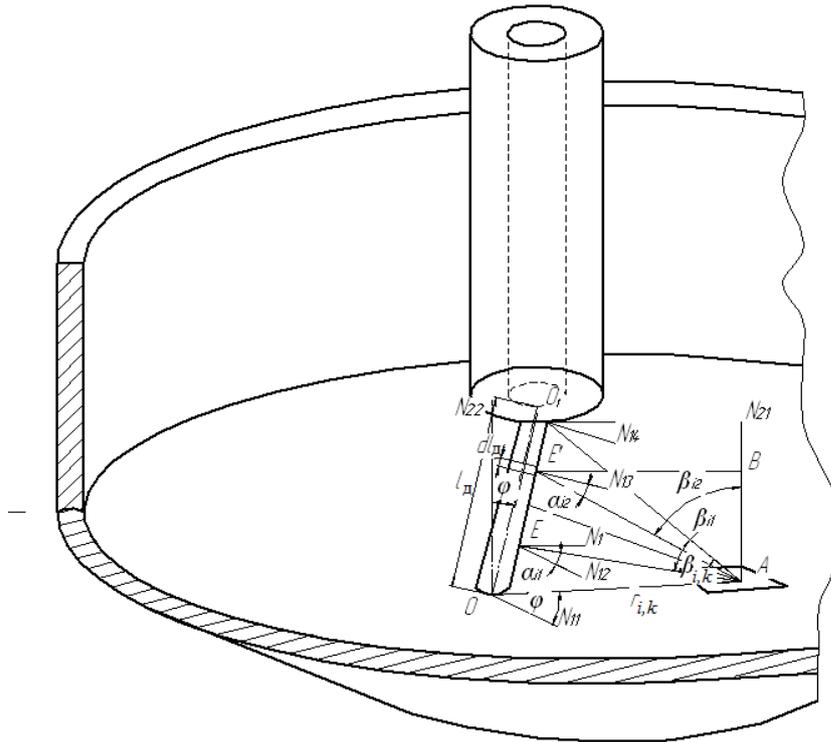


Рисунок 4.10 - Геометрические построения для расчета локального углового коэффициента излучения линейного источника на элементарные площадки, расположенную на плоскости, при взаимном пересечении линейного источника и плоскости, элементарная площадка находится с внутренней стороны линейного источника

Путем интегрирования выражения (4.54) в пределах изменения α_{i1} от 0 до φ и α_{i2} от 0 до $(\beta_{i,k}-\varphi)$ определяются локальные угловые коэффициенты излучения линейного источника на элементарную площадку, расположенную с внутренней стороны линейного источника [84]:

$$d\varphi_{ik} = \int_0^{\varphi} \frac{F_{i\dot{e}} \sin(\varphi - \alpha_{i1}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i1}) d\alpha_1}{\pi^2 r_{ik} l_{\dot{A}} \sin(\pi/2 - \varphi)} + \int_0^{\beta-\varphi} \frac{F_{i\dot{e}} \sin(\varphi - \alpha_{i2}) \sin(\pi/2 + \alpha_{i2}) d\alpha_2}{\pi^2 r_{ik} l_{\dot{A}} \sin(\pi/2 - \varphi)} = \quad (4.55)$$

$$= \frac{F_{i\dot{e}}}{2\pi^2 r_{ik} l_{\dot{A}}} \left\{ \sin^2(\beta_{i,k} - \varphi) - \sin^2 \varphi + tq\varphi [\beta_{i,k} + \sin \beta_{i,k} \cos(\beta_{i,k} - 2\varphi)] \right\}$$

Излучение электрической дуги на сектора, находящиеся справа от нее, рассчитываются по формуле:

$$q_{ik} = \frac{F_{ik} \cdot \alpha_D \cdot P_D}{2\pi^2 r_{ik} \cdot l_D} \left[\left[\left(\sin \left(\beta_{i,k} - \left(502,6 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right) \right)^2 \right. \right. \right. \quad (4.56)$$

$$\left. \left. \left. - \sin \left(502,6 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right)^2 \right) \right] \right]$$

$$+ \tan \left(502,6 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right) \cdot (\beta_{i,k} + \sin \beta)$$

$$\cdot \cos \left(\beta_{i,k} - 2 \cdot \left(502,6 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{ом\epsilon}}{D_{\text{эл}}} \right) + 42,56 \right) \right) \right]$$

Введем дополнительные геометрические построения для определения угла $\beta_{i,k}$. Для элементарных ячеек 1-го и 19-го сектора использовали построения, представленные на рисунке 4.11.

Для ячеек, расположенных под электрической дугой, (рис. 4.11.а) угол $\beta_{i,k}$ определим по формуле:

$$\beta_{i,k} = \pi - \gamma \quad (4.57)$$

где

$$\gamma = \arctg \left(\frac{h}{s - r_{i,k}} \right) \quad (4.58)$$

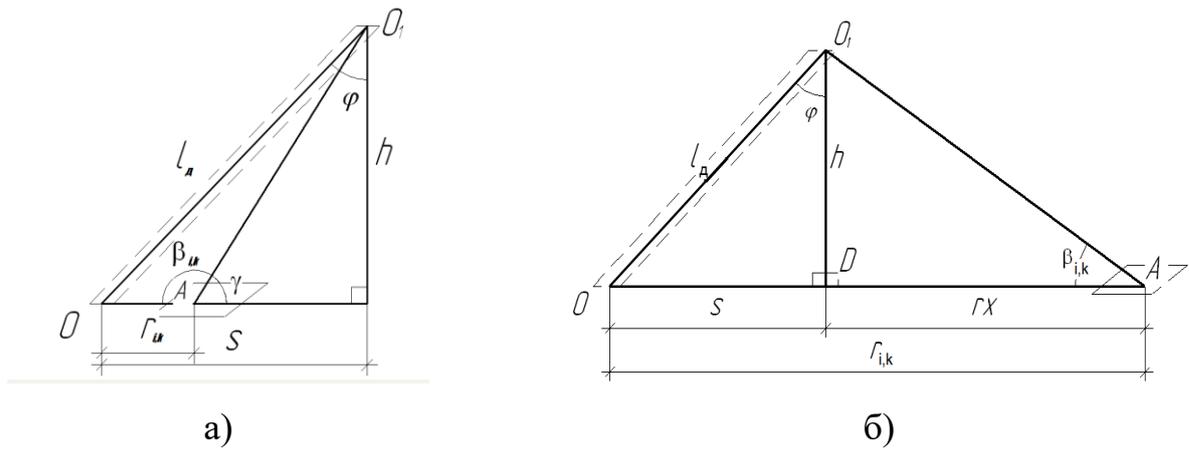


Рисунок 4.11 - Геометрические построения для нахождения угла $\beta_{i,k}$ в 1 и 19 секторе

Для остальных ячеек (рис.2.11б) определим угол $\beta_{i,k}$ по формуле:

$$\beta_{i,k} = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{h}{rx}\right) \quad (4.59)$$

где

$$rx = r_{i,k} - s \quad (4.60)$$

Для ячеек секторов со 2-го по 18-й применили построения, представленные на рисунке 4.12.

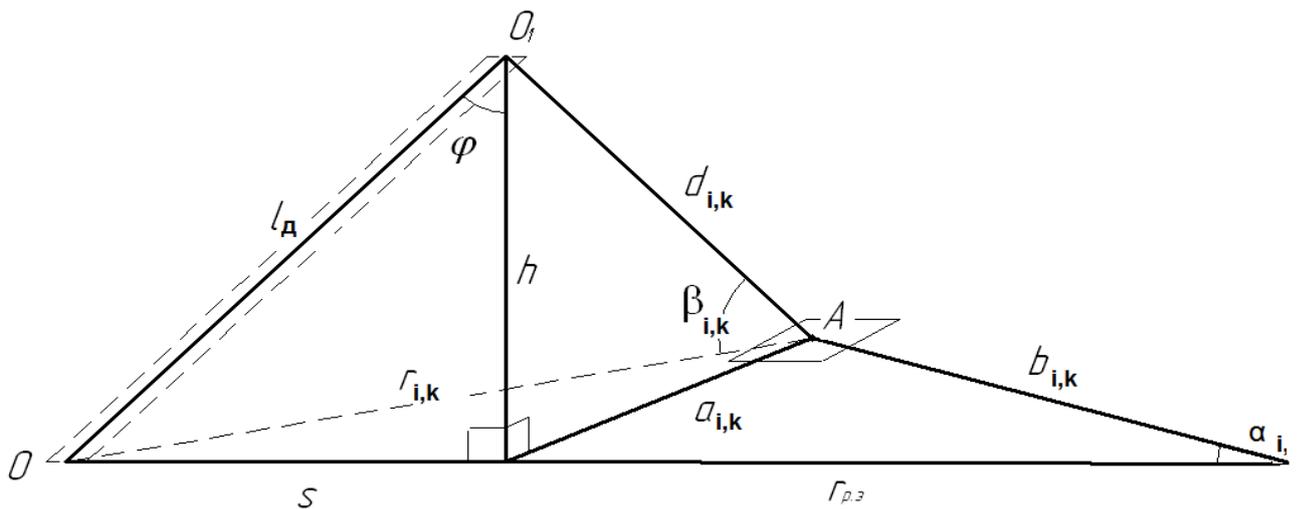


Рисунок 4.12 - Геометрические построения для нахождения угла $\beta_{i,k}$ в секторах со 2-го по 18-й

Применим теорему косинусов:

$$l_{Д}^2 = r_{i,k}^2 + d_{i,k}^2 - 2r_{i,k} \cdot d_{i,k} \cdot \cos\beta_{i,k} \Rightarrow \cos\beta_{i,k} = \frac{r_{i,k}^2 + d_{i,k}^2 - l_{Д}^2}{2 \cdot r_{i,k} \cdot d_{i,k}} \Rightarrow \quad (4.61)$$

$$\beta_{i,k} = \arctg\left(\frac{r_{i,k}^2 + d_{i,k}^2 - l_{Д}^2}{2 \cdot r_{i,k} \cdot d_{i,k}}\right)$$

Применив теорему Пифагора, найдем расстояние от пятна контакта электрической дуги на электроде до центра ячейки $d_{i,k}$:

$$d_{i,k} = \sqrt{a_{i,k}^2 + h^2} \quad (4.62)$$

а, используя теорему косинусов, получим $a_{i,k}$:

$$a_{i,k} = \sqrt{r_{p.э}^2 + b_{i,k}^2 - 2r_{p.э} \cdot b_{i,k} \cdot \cos\alpha_i} \quad (4.63)$$

Из 36 секторов, на которые разбита поверхность ванны ДСП, 1-й и 19-й сектор находятся на оси ОХ диаметрально противоположно друг другу, следовательно, плотности потоков излучения будут симметричны относительно этого диаметра.

Расчет тепловых потоков от электрических дуг к стенам дуговой печи начнем с определения координат центра каждого сектора.

По оси абсцисс (Ох):

$$x_{ci,k} = r_0 \cdot \cos\alpha_i \quad (4.64)$$

По оси ординат (Оу):

$$y_{ci,k} = r_0 \cdot \sin\alpha_i \quad (4.65)$$

где r_0 – расстояние от электрической дуги до стен первого сектора (при $z=0$), м.

Расстояния от центра печи до центров секторов вычисляются по формуле, выведенной из теоремы Пифагора:

$$b_{i,k} = \sqrt{x_{i,k}^2 + y_{i,k}^2} \quad (4.66)$$

Далее необходимо найти расстояния:

- от пятна электрической дуги на металле до стен:

для 1-го сектора:

$$r_{nik} = x_{cik} - cx \quad (4.67)$$

где

$$cx = s + r_{p.э} \quad (4.68)$$

для нахождения расстояния в остальных секторах была применена теорема косинусов:

$$r_{1i} = r_0 - r_{p.э} - r_э \quad (4.69)$$

где $r_э$ – радиус электрода, м;

для остальных секторов:

$$r_{1ik} = \sqrt{b_{ik}^2 + (r_{p.э} + r_э)^2 - 2 \cdot b_{ik} \cdot (r_{p.э} + r_э) \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.70)$$

от пятна электрической дуги на электроде до стены:

для 1 – го сектора

$$r_{6i} = x_{i,k} - r_{p.э} \quad (4.71)$$

для остальных секторов

$$r_{6i} = \sqrt{b_{i,k}^2 + r_{p.э}^2 - 2 \cdot b_{i,k} \cdot r_{p.э} \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.72)$$

Высоту каждого пояса найдем по формуле:

$$k_i = k_{cp} + k \cdot (i - 1) \quad (4.73)$$

где k_{cp} – половина высоты пояса, м; k – высота пояса, м.

Введем вспомогательную величину h_l и определим ее для поясов, расположенных на уровне вертикальной проекции электрической дуги, по формуле:

$$h_l = h - k_i \quad (4.74)$$

Для поясов, расположенных выше вертикальной проекции электрической дуги:

$$h_l = k_i - h \quad (4.75)$$

где h – высота электрической дуги.

Для расчета плотности теплового потока, падающего от электрической дуги длиной l_d на поверхность стен дуговой печи в точку А, расположенную на вертикальном участке стен (рис. 4.13). Выделим на электрической дуге элементарный цилиндр высотой dl . Расстояние dl до точки А равно l_i , оно значительно превышает высоту элемента электрической дуги dl . Угол между поверхностью ванны металла и лучом AO_1 равен β . Для точки А, расположенной на произвольной высоте вертикальных стен, получим выражение для вычисления плотности теплового потока от длинной электрической дуги. Рассмотрим излучение электрической дуги l_d в точке А как излучение двух ее участков длиной l_1 и l_2 (рис. 4.13). Здесь N_2 – нормаль в точке А на поверхности стен. Электрическая дуга излучает в точке А под углом β , ограниченным лучами АО и AO_1 . Обозначим угол между лучом $A1O$ и нормалью N_2 через β_2 , угол между $A1O_1$ и N_2 через β_1 , $\beta = \beta_1 + \beta_2$ [84].

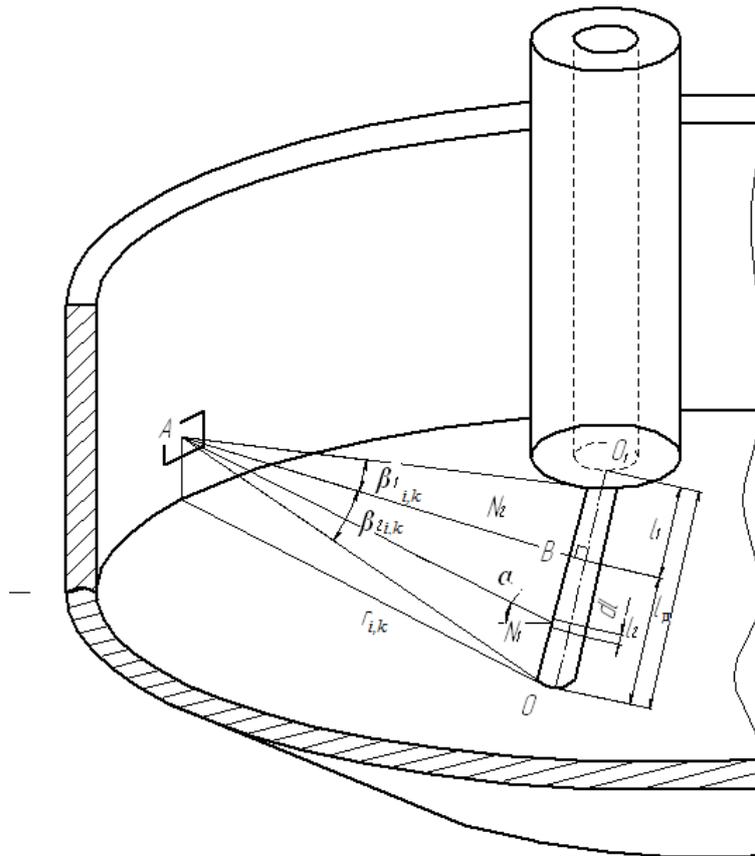


Рисунок 4.13 - Схема расчета излучения электрической дуги на участки вертикальных стен, расположенных напротив электрической дуги

Расчет плотности теплового потока, падающего от столба электрической дуги на поверхность стен, выполним по следующему выражению [84]:

$$q = \frac{\alpha_{\text{изл}} P_{\text{Д}} F_i}{2\pi^2 r_{i,k} l_{\text{Д}} F_i} (\beta_{i,k} + \sin\beta_{i,k} (\cos\beta_{1i,k} - \beta_{2i,k})) \quad (4.76)$$

$$= \frac{\alpha_{\text{изл}} P_{\text{Д}}}{2\pi^2 r_{i,k} l_{\text{Д}}} (\beta_{i,k} + \sin\beta_{i,k} \cos(\beta_{1i,k} - \beta_{2i,k}))$$

Ведем дополнительные геометрические построения для определения угла β (рис. 4.14).

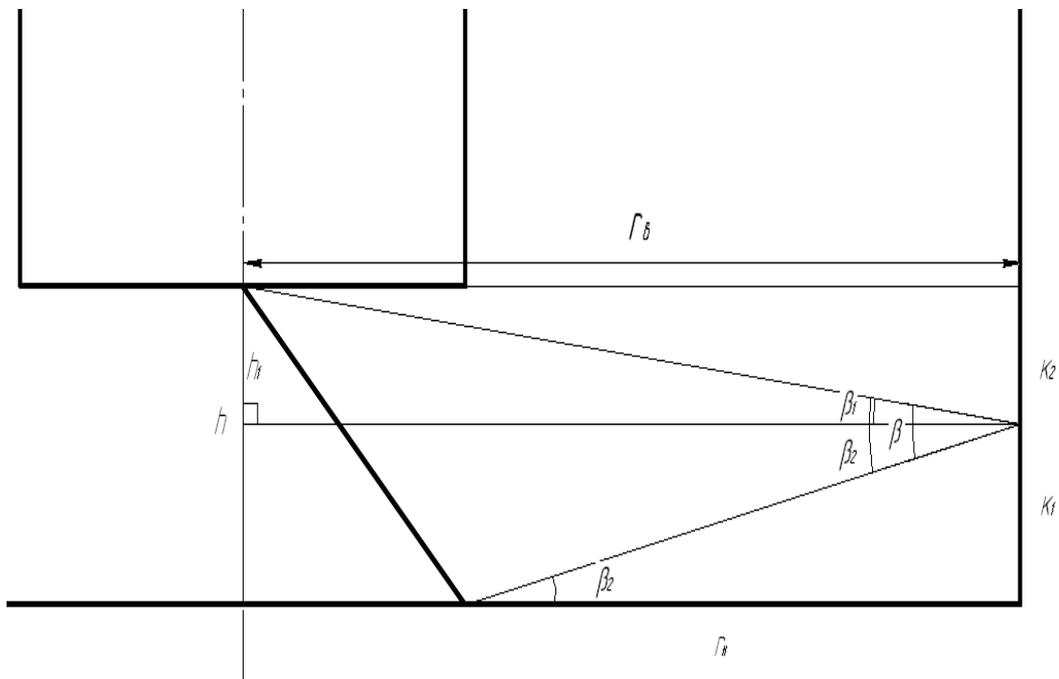


Рисунок 4.14 - Излучение электрической дуги на вертикальные стены на участки, расположенные напротив электрической дуги

Из построений (рис.4.14) получим:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\beta_{1i,k} &= \frac{h_{1k}}{r_{\epsilon i}} \Rightarrow \beta_{1i,k} = \operatorname{arctg} \frac{h_{1k}}{r_{\epsilon i}}; \\ \operatorname{tg}\beta_{2i,k} &= \frac{k_{1k}}{r_{ni}} \Rightarrow \beta_{2i,k} = \operatorname{arctg} \frac{k_{1k}}{r_{ni}}; \\ \beta_{i,k} &= \beta_{1i,k} + \beta_{2i,k} \end{aligned} \quad (4.77)$$

По выражению (4.76) можно выполнить расчет плотности теплового потока, падающего от длинной электрической дуги на поверхности вертикальных стен ДСП расположенных напротив электрической дуги.

В тех случаях, когда длина электрической дуги меньше высоты стен, а электрод заглублен в плавильное пространство печи, расчет необходимо производить следующим образом. Пусть точка А лежит на поверхности футеровки стен на расстоянии h_k от уровня расплава, причем $h_k > l_D$ (рис. 4.15). В данном случае электрод может экранировать часть электрической дуги от излучения в точке А. В точку А излучает открытая часть электрической дуги $l_{отк}$, ограниченная лучами АО и АО₁, которые образуют плоский угол β . Обозначим угол между нормалью N₂ и лучом АО через β_1 , угол между N₂ и лучом АО₁ через β_2 [84].

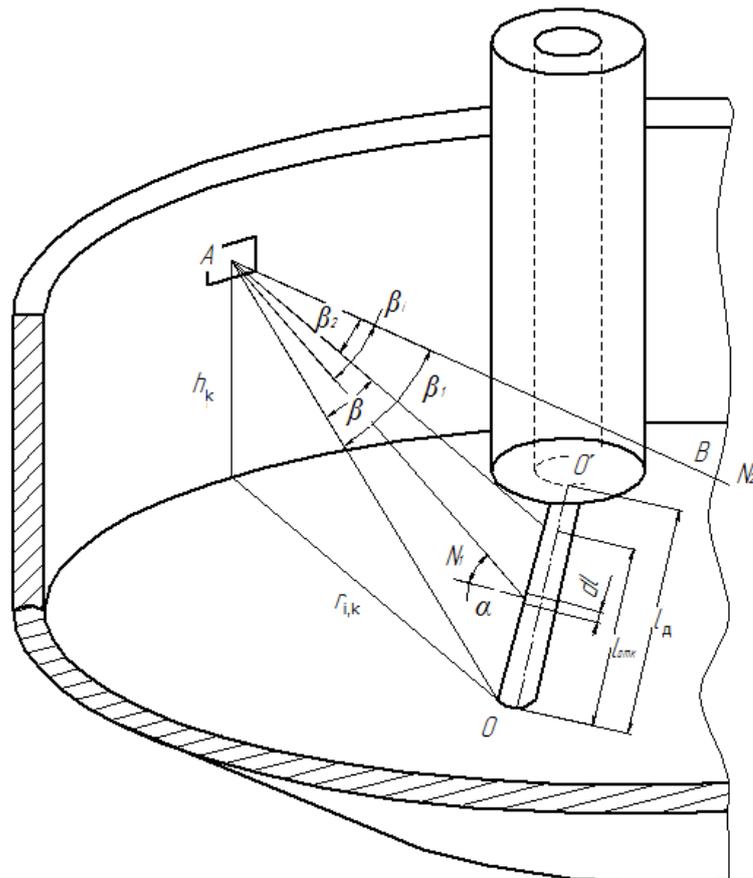


Рисунок 4.15 - Излучение электрической дуги на участки вертикальных стен, расположенных выше электрической дуги

Выражение для определения плотности потока излучения электрической дуги на участки вертикальных стен, расположенные на произвольной высоте, рассчитаем по формуле [84]:

$$q = \frac{\alpha_D \cdot P_D \cdot l_{отк}}{2 \cdot \pi^2 \cdot l_D \cdot r_{i,k}} (\beta_{i,k} + \sin \beta_{i,k} \cos(\beta_{1i,k} + \beta_{2i,k})) \quad (4.78)$$

Произведем дополнительные построения для определения открытой (не экранируемой торцом электрода) части электрической дуги (рис. 4.16) и угла β (рис. 4.17).

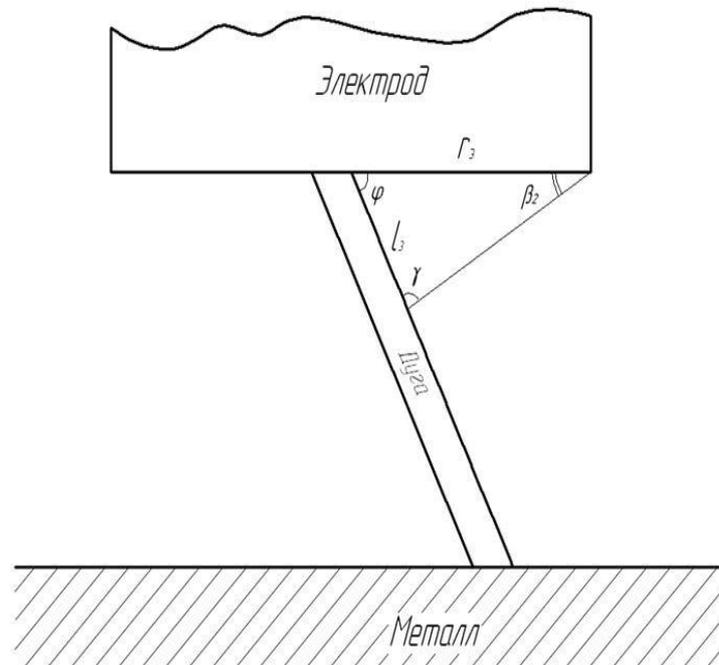


Рисунок 4.16 - Построения для определения открытой части электрической дуги

Из построений (рис. 4.16) получим:

$$l_D = l_{отк} + l_3 \quad (4.79)$$

$$l_{отк} = l_D - l_3 \quad (4.80)$$

По теореме синусов:

$$\frac{r_3}{\sin \gamma} = \frac{l_3}{\sin \beta_2} \Rightarrow l_3 = \frac{r_3 \cdot \sin \beta_2}{\sin \gamma} \quad (4.81)$$

где

$$\gamma = (\pi - (\beta_2 + \varphi)) \quad (4.82)$$

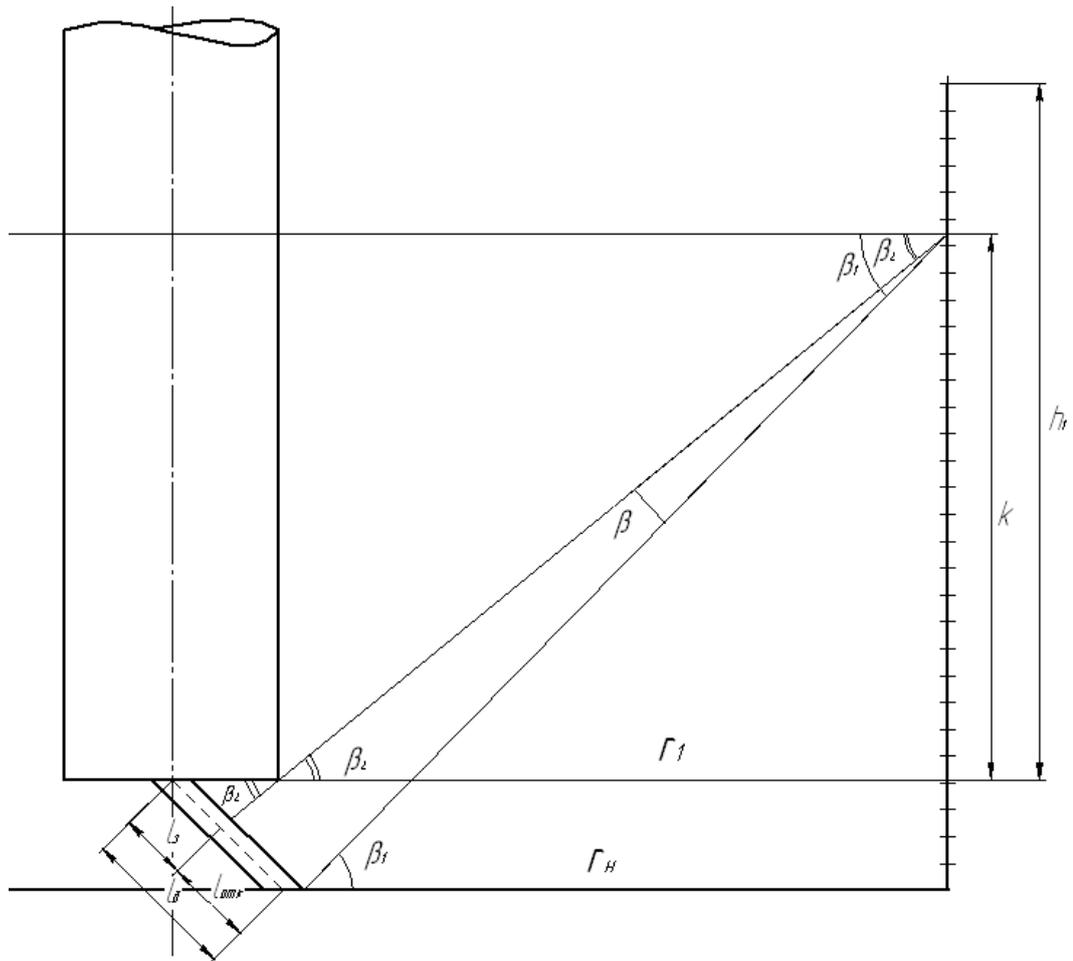


Рисунок 4.17 - Излучение электрической дуги на участки вертикальных стен, расположенные на произвольной высоте

$$\tan \beta_2 = \frac{k_i}{r_H} \rightarrow \beta_2 = \arctan \frac{k_i}{r_H} \quad (4.83)$$

$$\tan \beta_1 = \frac{h_1}{r_1} \rightarrow \beta_1 = \arctan \frac{h_1}{r_1} \quad (4.84)$$

$$\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (4.85)$$

Расчет тепловых потоков от электрических дуг к своду дуговой печи начнем с определения координаты центров элементарных ячеек. Ось абсцисс (Ox):

- для 1-го и 19-го сектора

$$x_{i,k} = r_{яч} + s_{яч}(k-1) \quad (4.86)$$

- для секторов со 2-го по 18-й:

$$x_{i,k} = r_{яч} \cdot \cos \alpha_i + s_{яч} \cdot \cos \alpha_i \cdot (k-1) \quad (4.87)$$

Ось ординат (Oy):

- в 1 и 19 $y_{i,k} = 0$;

- со 2-го по 18-й сектор:

$$y_{i,k} = r_{яч} \cdot \sin \alpha_i + s_{яч} \cdot \sin \alpha_i \cdot (k-1) \quad (4.88)$$

где $s_{яч}$ – ширина элементарной ячейки, м; $r_{яч}$ – расстояние от центра печи до центра элементарной площадки первого кольца, м.

Расстояния от центра свода печи до центров элементарных площадок: для 1-го и 19-го сектора равны x , а со 2-го по 18-й сектор вычисляются по формуле, выведенной из теоремы Пифагора:

$$b_{i,k} = \sqrt{x_{i,k}^2 + y_{i,k}^2} \quad (4.89)$$

Далее необходимо найти расстояния:

- от электрической дуги до свода: для 1-го сектора для колец, расположенных справа от пятна электрической дуги на ванне металла:

$$r_{н1k} = cx - x_{1k} \quad (4.90)$$

- для колец, расположенных слева от пятна электрической дуги на ванне металла:

$$r_{н1k} = x_{1k} - cx \quad (4.91)$$

где $cx = s + r_{п.э.}$, для нахождения расстояния в остальных секторах была применена теорема косинусов:

$$r_{ни} = \sqrt{x_{i,k}^2 + cx^2 - 2 \cdot x_{i,k} \cdot cx \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.92)$$

- от торца электрода до свода: для 1-го сектора

$$r_{cp} = (r_{п.э.} + r_{э}) - x_i \quad (4.93)$$

$$r_{cp} = r - r_{п.э.} - r_{э} \quad (4.94)$$

- для остальных секторов

$$r_{1i,k} = \sqrt{b_{i,k}^2 + (r_{p.э} + r_э)^2 - 2 \cdot b_{i,k} \cdot (r_{p.э} + r_э) \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.95)$$

- от центра электрода до свода: для 1 – го сектора

$$r_{ei,k} = r_{p.э} - x_{i,k} \quad (4.96)$$

$$r_{eik} = x_i - r_{p.э}. \quad (4.97)$$

- для остальных секторов

$$r_{ei,k} = \sqrt{b_{i,k}^2 + r_{p.э}^2 - 2 \cdot b_{i,k} \cdot r_{p.э} \cdot \cos \alpha_i} \quad (4.98)$$

Найдем высоту от металла до элементарной ячейки

Для участка свода с ровной поверхностью:

$$H_{св.макс} = h_{ст} + h_{max\ свода} \quad (4.99)$$

Для участка с наклонным сводом:

$$H_{св} = H_{св.макс} - (\Delta h / 2) \quad (4.100)$$

где $h_{ст}$ – высота стен, м; $h_{max\ свода}$ – максимальный подъем свода, м; Δh – половина высоты ячейки.

Высота от торца электрода до элементарной ячейки

$$h_{ik} = H_{св.макс} - h \quad (4.101)$$

$$h_{i,k} = H_{св} - h \quad (2.102)$$

Найдем закрытую часть электрической дуги:

$$l_{д} = l_{отк} + l_3 \quad (4.103)$$

$$l_{отк} = l_{д} - l_3 \quad (4.104)$$

По теореме синусов:

$$\frac{r_э}{\sin \gamma} = \frac{l_3}{\sin \beta_2} \Rightarrow l_3 = \frac{r_э \cdot \sin \beta_2}{\sin \gamma} \quad (4.105)$$

где

$$\gamma = (\pi - (\beta_2 + \varphi)) \quad (4.106)$$

В точке А излучает только открытая часть электрической дуги $l_{отк}$, видимая из точки А под углом $\beta_{i,k}$. Обозначим угол между прямой АВ, проведенной из точки А по кратчайшему расстоянию до оси электрода, и лучом АО через β_1 , а

угол между АВ и лучом АО' через β_2 . Угол между нормалью N2 и прямой АВ – угол φ . Согласно построениям, изображенным на рисунке 4.18, следует [84]:

$$\begin{cases} \angle\beta = \angle\varphi - \angle\alpha \\ \cos\beta = \cos(\varphi - \alpha) \end{cases} \quad (4.107)$$

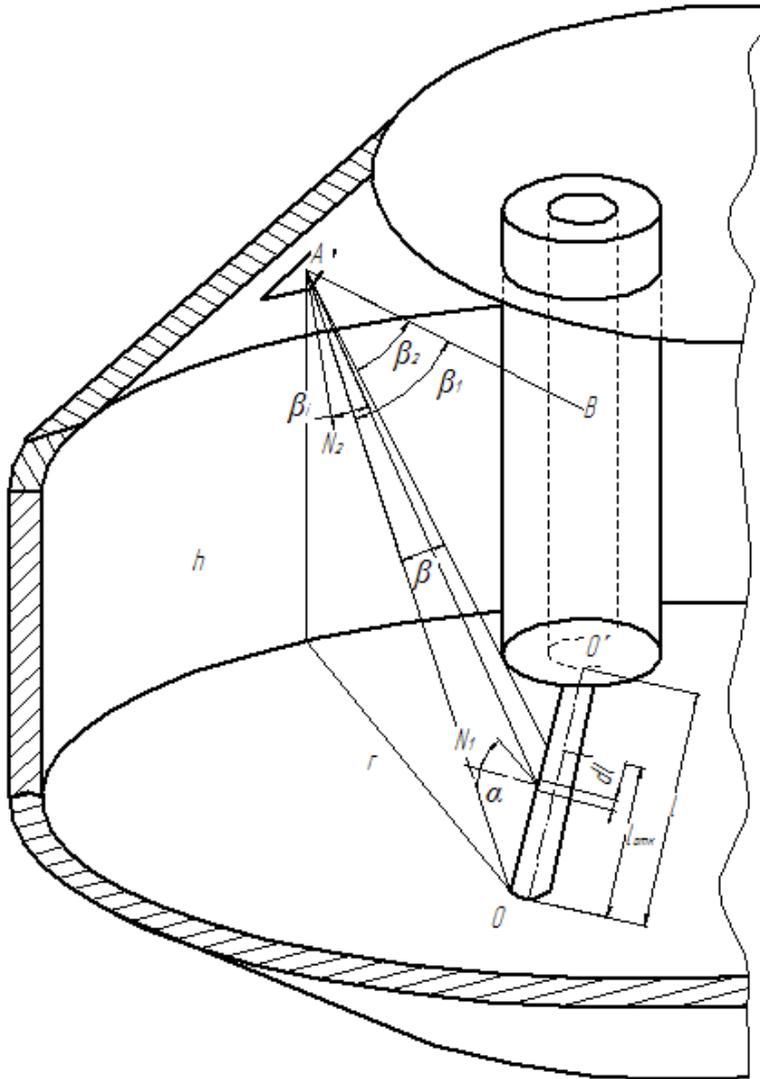


Рисунок 4.18 - Излучение электрической дуги на свод дуговой печи

Так как функция \cos четная, то есть $\cos(-x) = \cos x$, то можно записать:

$$\cos\beta_{i,k} = \cos(\varphi - \alpha) = \cos(\alpha - \varphi) \quad (4.108)$$

Выражение для определения плотности потока излучения электрической дуги на участки свода электродуговой печи, расположенные на произвольной высоте, рассчитаем по формуле [84]:

$$q = \frac{\alpha_{\text{изл}} P_{\text{Д}} l_{\text{отк}}}{2\pi^2 r l_{\text{Д}}^2} \left\{ \cos\varphi [\beta_{i,k} + \sin\beta_{i,k} \cos\varphi (\beta_{1i,k} + \beta_{2i,k})] \right. \\ \left. + \sin\left(502,6 \left(\frac{d_{\text{омс}}}{D_{\text{эл}}}\right)^2 - 258,3 \left(\frac{d_{\text{омс}}}{D_{\text{эл}}}\right) + 42,56\right) (\sin^2\beta_{1i,k} - \sin^2\beta_{2i,k}) \right\}. \quad (4.109)$$

Для определения угла $\beta_{i,k}$ используем построения, представленные на рисунке 4.19.

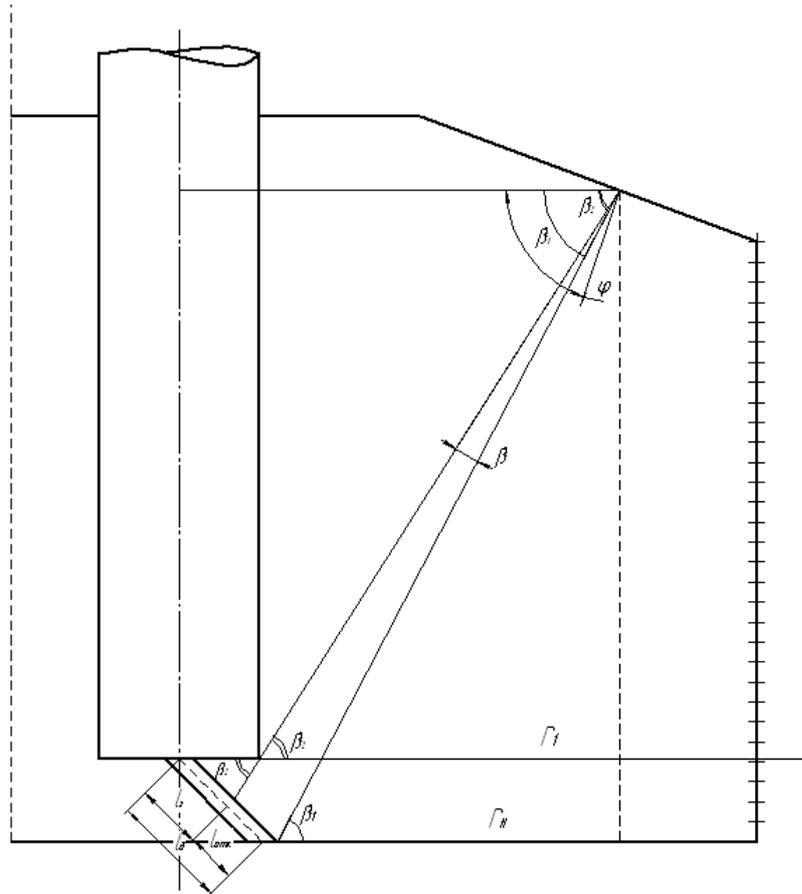


Рисунок 4.19 - Дополнительные построения для определения угла $\beta_{i,k}$

$$\operatorname{tg}\beta_1 = \frac{h}{r_n} \Rightarrow \beta_1 = \operatorname{arctg} \frac{h}{r_n}; \quad (4.110)$$

$$\operatorname{tg}\beta_2 = \frac{h_1}{r_{cp}} \Rightarrow \beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{h_1}{r_{cp}}; \quad (4.111)$$

$$\beta_{i,k} = \beta_1 - \beta_2 \quad (4.112)$$

На основе данной модели была составлена программа для расчета процессов теплообмена в рабочем пространстве ДСП, которая была реализована в программе MS Excel.

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

Основной величиной, определяющей эффективность тепловой работы ДСП, является характер теплообмена в ее рабочем пространстве. На сегодняшний момент для проведения анализа тепловых процессов в ДСП все чаще применяют математическое моделирование, чему способствует стремительное развитие компьютерной техники и широкий спектр программных продуктов. В этой связи с помощью математической модели, описанной выше, был выполнен анализ эффективности тепловой работы 7 т. ДСП с использованием трубчатых электродов в сравнении со сплошными.

Результаты расчета представлены на рисунках 4.20, 4.21, и 4.22. Анализ полученных результатов показывает изменения в распределении тепловых потоков в рабочем пространстве ДСП при ее работе на трубчатых и сплошных электродах. Так применение трубчатых электродов позволяет более равномерно распределить тепло по поверхности металла (в период жидкой ванны). Это обусловлено в первую очередь тем, что снижается степень выдувания электрической дуги из-под торца электрода, то есть электрическая дуга горит более вертикально, что позволяет создать направленный тепловой поток на поверхность металла (рис. 4.20). Кроме того, применение трубчатых электродов позволяет повысить максимальную величину теплового потока на поверхность металла в зоне горения электрической дуги и сместить этот максимум ближе к центру печи, что позволит повысить скорость нагрева металла за счет более эффективного использования тепла электрической дуги.

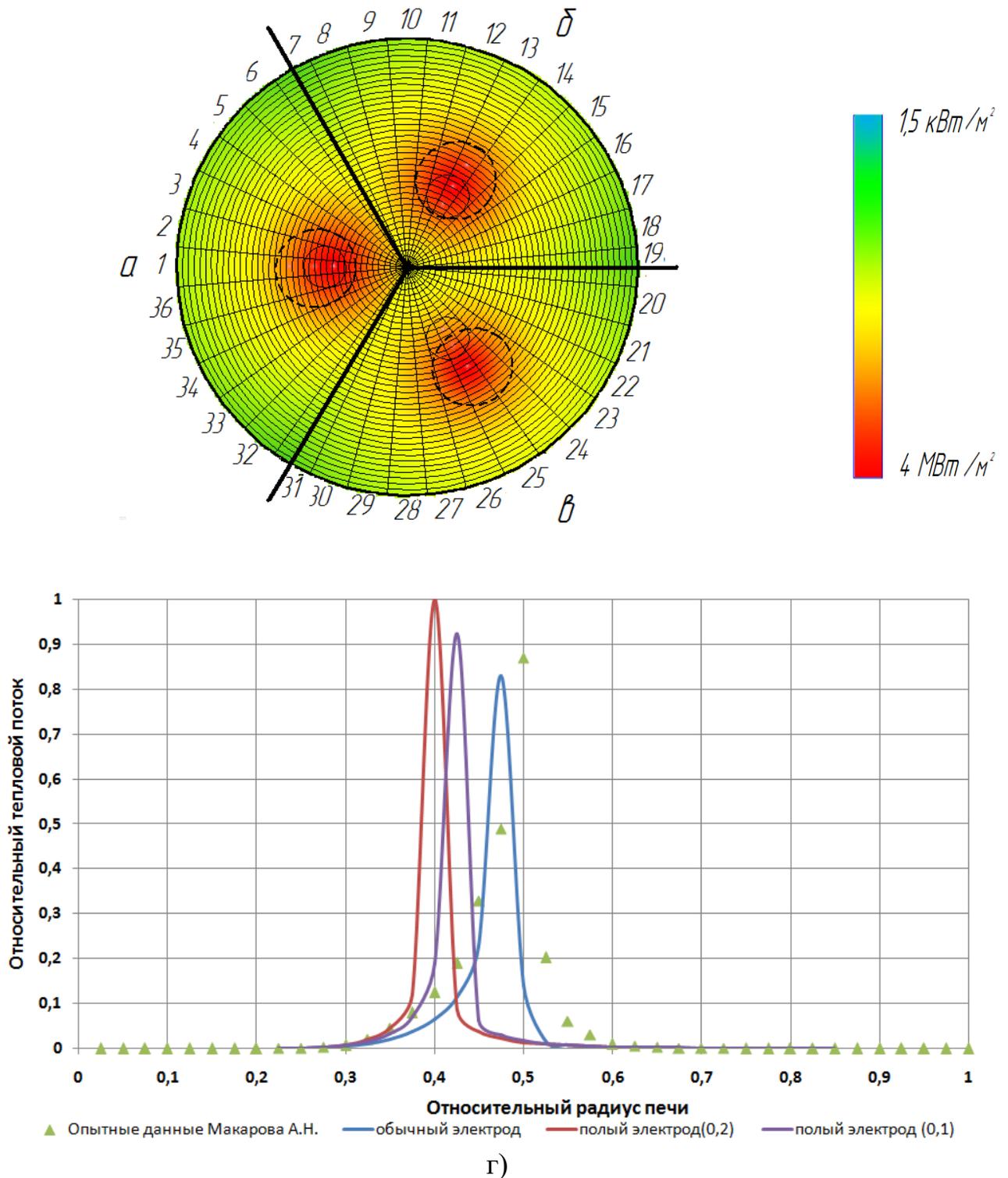
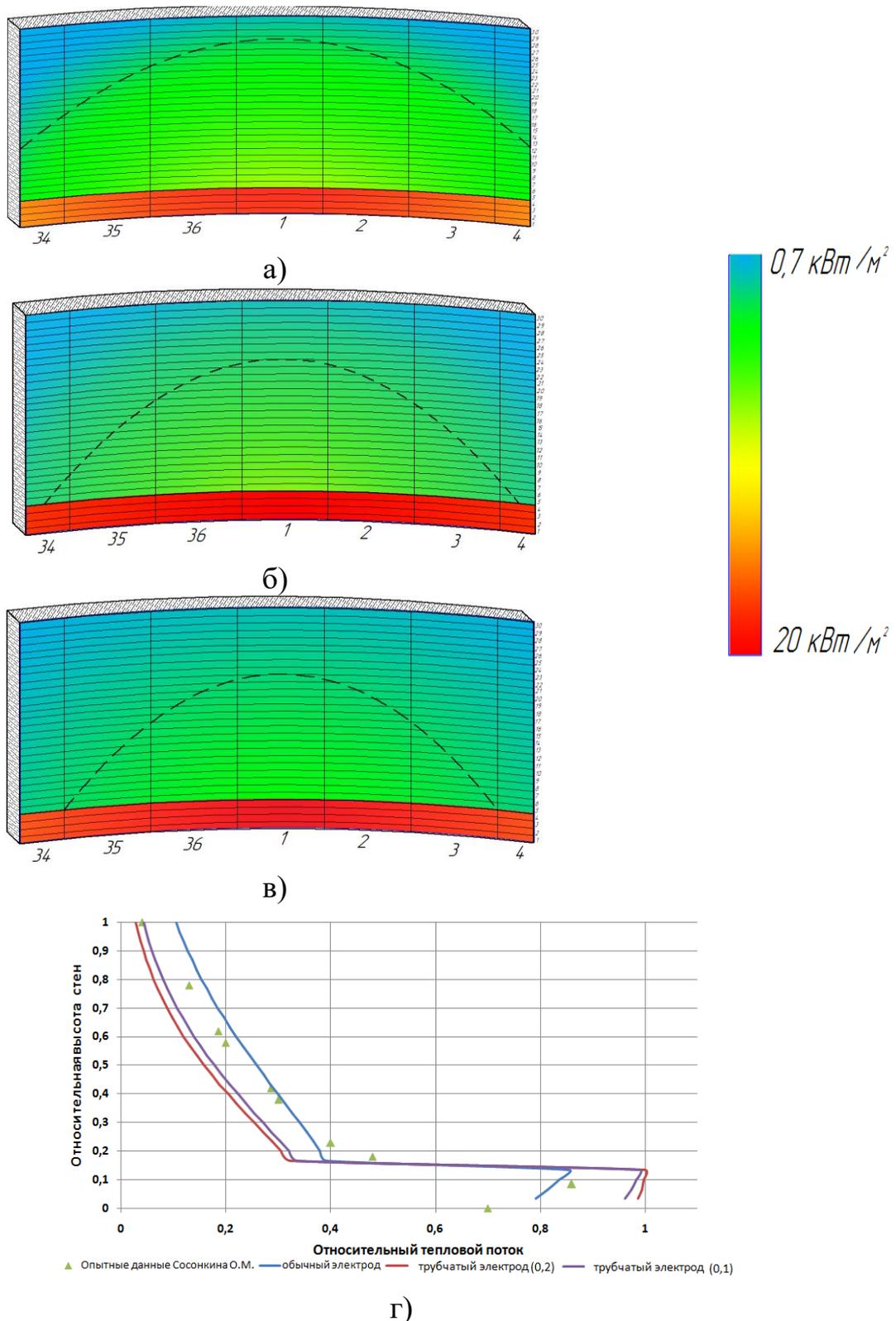
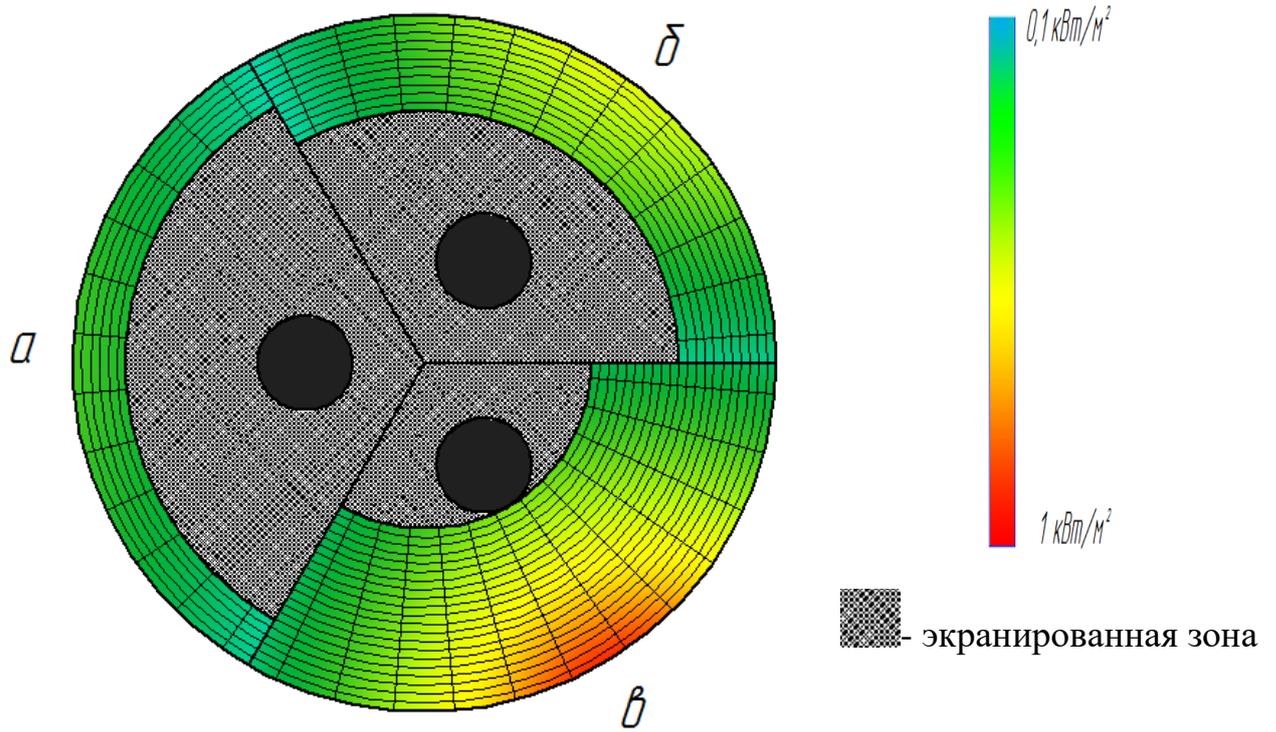


Рисунок 4.20 - Распределение плотности теплового потока по поверхности ванны металла ДСП: а) с применением трубчатого электрода ($d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}} = 0,2$); б) с применением трубчатого электрода ($d_{\text{отв}}/D_{\text{эл}} = 0,1$); в) с применением сплошного электрода; г) по поверхности первого сектора с применением сплошного электрода и трубчатого электрода

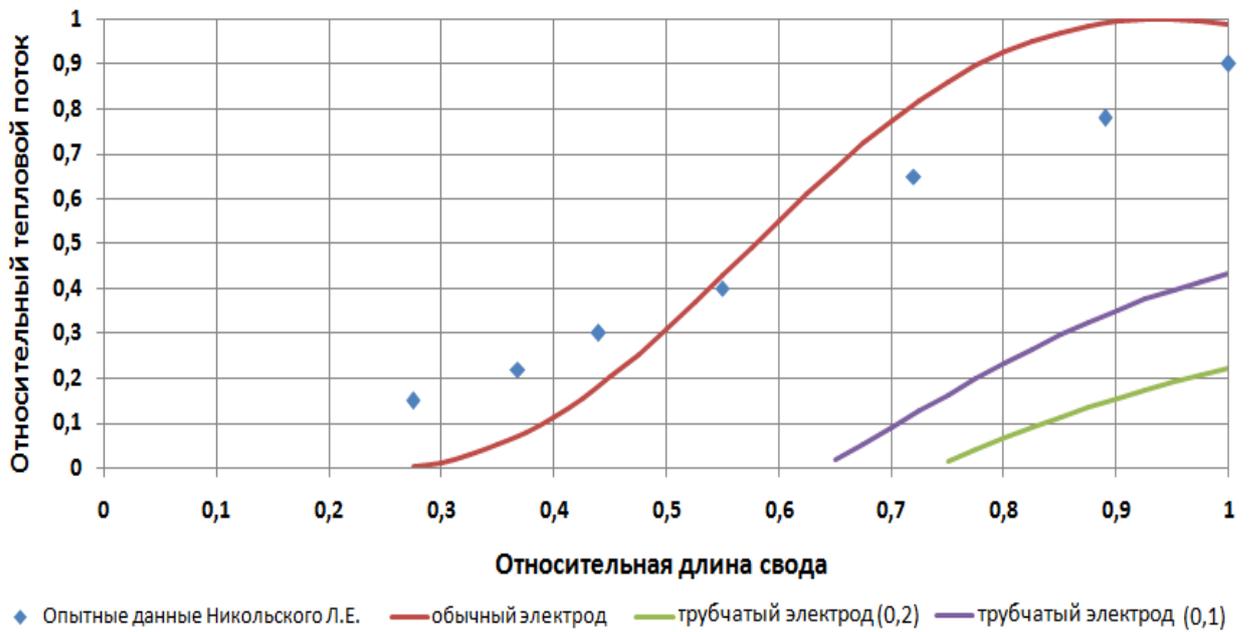


г)

Рисунок 4.21 - Распределение плотности теплового потока по поверхности стен ДСП: а) с применением сплошного электрода; б) с применением трубчатого электрода ($d_{отв}/D_{эл} = 0,1$); в) с применением трубчатого электрода ($d_{отв}/D_{эл} = 0,2$); г) по поверхности первого сектора с применением сплошного электрода и трубчатых электродов



а)



б)

Рисунок 4.22 - Распределение плотности теплового потока по поверхности свода ДСП применением сплошного электрода и трубчатого электрода: а) по всей поверхности б) по поверхности первого сектора

Как показывает анализ диаграмм и графиков, представленных на рисунках 4.21 и 4.22, применение трубчатых электродов в сравнении со сплошными электродами позволяет снизить величину облученности стен и свода печи. Это в свою очередь позволит снизить величину тепловых потерь и тем самым повысить эффективность тепловой работы ДСП.

Таким образом, в результате математического моделирования установлено, что применение трубчатых электродов является достаточно эффективным с энергетической точки зрения и позволяет повысить эффективность тепловой работы ДСП, а именно: позволяет повысить максимальную величину теплового потока на поверхность металла в зоне горения электрической дуги при использовании электродов с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$ на 15 %, с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$ на 10,5 %, сместить этот максимум ближе к центру печи, что позволяет более равномерно распределить тепло по поверхности металла и уменьшить величину теплового потока на поверхность стен и свода печи.

4.5 Оценка коэффициента использования тепла электрических дуг при использовании трубчатых электродов

Основным источником энергии в ДСП является электрическая дуга. В связи с этим предоставляется целесообразным оценить коэффициент использования тепла $\eta_{кит}^э$ электрических дуг при использовании трубчатого электрода, так он косвенно определяет величину удельного расхода электроэнергии на тонну стали [107], т.е. чем больше величина $\eta_{кит}^э$, тем меньше удельный расход электроэнергии.

Величину коэффициента использования тепла можно оценить, воспользовавшись следующим выражением [55, 108]:

$$\eta_{кит}^э = \frac{0,8 \cdot P_{a-k} + 0,05 \cdot P_D + \phi_{D-m} \cdot (P_D - P_{a-k} - 0,05 \cdot P_D)}{P_D} \quad (4.113)$$

где P_d – мощность электрической дуги, идущая на нагрев и расплавление металла; P_{a-k} – мощность, которая выделяется в анодном и катодном пятне; ϕ_{d-m} – средний угловой коэффициент излучения электрической дуги на металл, который показывает долю мощности электрической дуги, излучаемую столбом электрической дуги на металлическую ванну.

Величину мощности электрической дуги, а также мощности, выделяющейся в анодном и катодном пятнах, определим в соответствии с методикой, изложенной в работах [107, 108]. Для расчета величины среднего углового коэффициента излучения столба электрической дуги на поверхность металла воспользуемся математической моделью, описанной выше. Для этого сначала рассчитаем величину локальных угловых коэффициентов излучения столба электрической дуги, затем путем их суммирования определим средний угловой коэффициент излучения.

Результаты расчета средних угловых коэффициентов излучения электрических дуг и величины коэффициента использования тепла электрических дуг приведены в таблице 4.1.

Анализ результатов расчета (табл. 4.1.) показывает, что величина коэффициента использования тепла электрических дуг в период жидкой ванны для ДСП, работающей на трубчатом электроде с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$, составляет $\eta_{кут}^э = 0,64$, а с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$ составляет $\eta_{кут}^э = 0,62$, что на 10,3% и 6,9 % соответственно выше, чем при работе ДСП на сплошном электроде ($\eta_{кут}^э = 0,58$). Это объясняется тем, что за счет большего заглубления электрической дуги в шлак и металл и эффективного экранирования электрической дуги торцом электрода, уменьшается интенсивность облучения футеровки стен, что позволяет организовать более направленный тепловой поток от электрической дуги на жидкую ванну металла, тем самым интенсифицировать тепловую работу ДСП. Это подтверждается расчетами величины среднего углового коэффициента излучения электрической дуги на металл в период

жидкой ванны, так для печи, работающей на трубчатом электроде с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$, составляет $\phi_{д-м} = 0,62$, а с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$ составляет $\phi_{д-м} = 0,60$, а при работе на сплошном $\phi_{д-м} = 0,55$. Необходимо отметить, что коэффициент использования тепла электрических дуг в ДСП, работающих на трубчатых электродах, в сравнении с работой на сплошных электродах будет больше на протяжении всего времени плавки, так как после прорезки колодцев электрические дуги заглубляются в жидкометаллическую ванну. Все это говорит о том, что применение в дуговых печах трубчатых электродов позволяет увеличить вводимую в ванну тепловую мощность и сократить удельный расход электроэнергии на плавку. Другими словами, применение трубчатых электродов в ДСП является экономически целесообразным и позволяет улучшить технико-экономические показатели работы ДСП [108].

Таблица 4.1 - Сравнительные данные тепловой работы ДСП на сплошных и трубчатых электродах

Параметр	Значение параметра		
	Сплошной электрод	Трубчатый электрод ($d_{отв}/D_{эл} = 0,1$)	Трубчатый электрод ($d_{отв}/D_{эл} = 0,2$)
Вместимость печи, т	6	6	6
Мощность полная, кВА	4	4	4
Ток электрической дуги, кА	8,22	8,22	8,22
Диаметр электрода, мм	300	300	300
Диаметр отверстия, мм	-	30	60
Угол отклонения электрической дуги от оси электрода, град	45	20	10
Средний угловой коэффициент излучения электрической дуги на металл	0,55	0,6	0,62
Коэффициент использования тепла электрической дуги	0,58	0,62	0,64

4.6 Выводы по главе 4

Выполнен анализ особенностей тепловой работы современных ДСП. Рассмотрены существующие методики изучения эффективности тепловой работы ДСП. На основе анализа для оценки эффективности тепловой работы ДСП при работе на электродах различной конструкции (сплошной и трубчатый электрод) был выбран метод математического моделирования. Данный метод при достаточной сложности изучения тепловой работы ДСП в реальных условиях является достаточно эффективным при вводе определенных допущений.

В связи с этим в данной главе была разработана математическая модель, в основу которой была положена методика расчета А.Н. Макарова.

Выполнен сравнительный анализ теплообмена в рабочем пространстве ДСП, в ходе которого установлено, что применение трубчатых электродов в сравнении с типовыми сплошными является достаточно эффективным с энергетической точки зрения и позволяет повысить эффективность тепловой работы ДСП, а именно: позволяет повысить максимальную величину теплового потока на поверхность металла в зоне горения электрической дуги при использовании электродов с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,2$ на 15 %, с отношением $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$ на 10,5 %, сместить этот максимум ближе к центру печи, что позволяет более равномерно распределить тепло по поверхности металла и уменьшить величину теплового потока на поверхность стен и свода печи.

Аналитическим путем установлено, что при равных условиях проведения электроплавки стали в ДСП одинаковой мощности и вместимости, наибольший коэффициент использования тепла электрических дуг наблюдается на печах, работающих на трубчатом электроде, за счет большего среднего углового коэффициента излучения электрических дуг на поверхность металла и организации более направленного теплового потока.

ГЛАВА 5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ДСП-6-2Н

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

Исследования были проведены в условиях действующего производства на дуговой сталеплавильной печи литейного цеха ОАО «ОЗММ». В цехе работают 5 печей вместимостью 6 и 14 тонн с основной футеровкой, предназначенные для выплавки стали и сплавов. Для проведения исследований была выбрана электропечь ДСП - 6-2Н №6 емкостью 6 тонн (рис. 5.1).



А



Б

Рисунок 5.1 - Фотографии ДСП - 6-2Н литейного цеха ОАО «ОЗММ». А – вид со стороны рабочего окна; Б – вид со стороны сливного желоба

Электропечь ДСП - 6Н2 относится к группе трехфазных дуговых электропечей прямого действия.

Основным назначением электропечи является выплавка стали для фасонного литья и слитков скрап-процессом.

Технические характеристики дуговой печи представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Технические характеристики ДСП-6-2Н

N п/п	Наименование	Единица измерения	Величина
1	Емкость печи	Т	6
2	Мощность электропечного трансформатора	кВа	4000+20%
3	Пределы вторичного напряжения	вольт	281 - 130
4	Максимальный ток электричества	ампер	9860
5	Количество фаз		3
6	Частота тока	Гц	50
7	Диаметр электрода	мм	300
8	Диаметр распада электродов	мм	1000+50
9	Ход электрода	мм	2000+/-50
10	Оптимальная скорость перемещения электродов вверх: в ручную/в авт. режиме	мм/сек	80/60
11	Диаметр плавильного пространства	мм	2900
12	Высота плавильного пространства	мм	1100
13	Диаметр ванны на уровне откосов	мм	2230
14	Диаметр зеркала металла	мм	2060
15	Глубина ванны от уровня порога	мм	425
16	Размер рабочего окна ширина/ высота	мм	750/500
17	Внутренний диаметр кожуха: макс./мин.	мм	3500/3190
18	Минимальное время наклона печи на 40°	сек	70

Продолжение таблицы 5.1

N п/п	Наименование	Единица измерения	Величина
19	Удельный расход электроэнергии на расплавление твердой шихты	кВт·ч/т	480
20	Расход охлаждающей воды	м ³ /ч	20
21	Вес металлоконструкций печей	т	50+/-10%
22	Габаритные размеры	мм	7620/7460/7425

Электропечь комплектуется трехфазным трансформаторным агрегатом с принудительным водомасленным охлаждением типа ЭТЦП - 10000/10 мощностью 4000+20% кВА с переключением ступеней напряжения без нагрузки. Основные технические данные электропечного трансформатора представлены в таблице 5.2.

Переключение ступеней напряжения осуществляется дистанционно при отключении высоковольтного выключателя, для чего в схеме предусмотрена блокировка и реле, исключающая возможность работы переключающего устройства при включенном выключателе. Управление переключателем ступеней напряжений может быть осуществлено вручную при помощи рукоятки, расположенной на приводном механизме. Для питания печного трансформатора предусмотрено комплектное распределительное устройство, которое допускает частые оперирования и служит как для оперативных включений и отключений цепи, так и для отключений цепи при длительных перегрузках трансформатора и других аварийных состояниях установки (подъем свода, наклон печи, повышение температуры масла печного трансформатора, срабатывания газового реле). Схема предусматривает: учет активной и реактивной энергии на высокой стороне; измерение активной мощности; измерение напряжения на высокой стороне; сигнализацию положения высоковольтного выключателя, предупреждающую сигнализацию о превышении температуры масла печного трансформатора,

срабатывания газовой защиты и других аварийных состояний; измерение токов в электродах.

Таблица 5.2 - Основные технические данные и характеристики электропечного трансформатора ЭТЦП - 10000/10

Ступень трансформатора	Мощность, кВт	Сторона ВН		Сторона НН		Частота, Гц	Напряжение КЗ агрегата, %
		Напряжение, В	Ток, А	Напряжение, В	Ток, А		
1	4000	10000	230,6	281	8220	50	19,9
2	3560		205,8	250			10,5
3	2910		167,8	205			19,8
4	3200		185	225			19,8
5	4000		230,6	281			15,9
6	3560		205,8	250			16,9
7	2910		167,8	205			16,8
8	3200		185	225			16,5
9	2310		133,3	162			18
10	2060		119	144			20,6
11	1680		97	118			22,1
12	1850		107	130			21,1

В схеме предусмотрены согласующие трансформаторы, подключенные к переключателям ступеней напряжения печного трансформатора, с целью получения при различных ступенях напряжения на печном трансформаторе

одинакового напряжения на выходных цепях электрогидравлического регулятора мощности.

Для подвода электрической энергии на печи используют графитированные электроды марки ЭГ-20, основные их характеристики представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Характеристики графитированных электродов ЭГ-20

Наименование	Единица измерения	Значение
Номинальный диаметр	мм	300
Номинальная длина	мм	1800
Границы допустимой плотности тока	А/см ²	15-20
Объемная плотность	г/см ³	1,62
Содержание зольных примесей	%	0,3
Удельное электросопротивление	мкОм•м	7,5
Термический коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6}$ (20-520) ⁰ С	1/ ⁰ С	2,2
Предел механической прочности на изгиб	МПа	10,0
Модуль упругости (Юнга)	ГПа	8,0

Выплавку стали производят методом полного окисления и методом переплава. Выплавка может производиться одно- и двух-шлаковым процессом. Выбор процесса производится с учетом качества шихтовых материалов и требований, предъявляемых к готовой стали и оговаривается частными инструкциями или технологическими указаниями.

Плавление производится в соответствии с утвержденными электрическими режимами. Примеры режимов работы методом окисления и переплава представлены на рисунках 5.2 и 5.3.

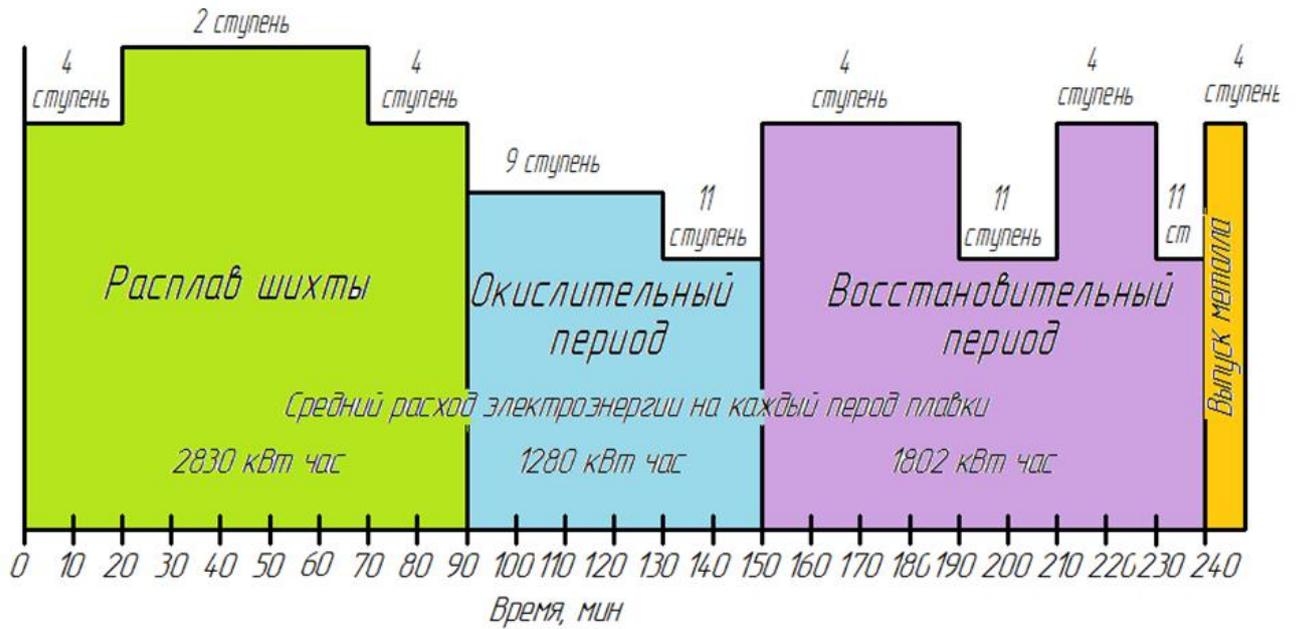


Рисунок 5.2 - Режим работы ДСП-6-2Н при выплавке стали марки 110Г13Л методом окисления

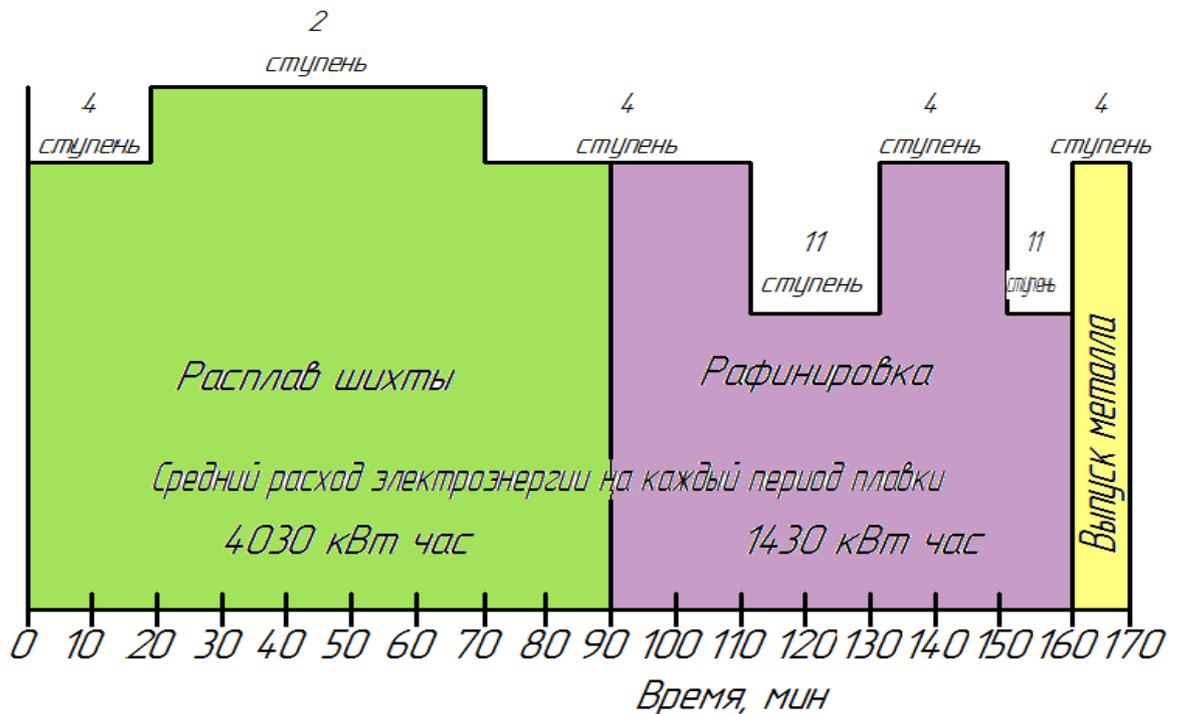


Рисунок 5.3 - Режим работы ДСП-6-2Н при выплавке стали марки 110Г13Л методом переплава

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

Анализ полученных в ходе экспериментов и математического моделирования данных (глава 2 – 4) показывает перспективность применения трубчатых электродов на дуговых сталеплавильных печах. С целью оценки эффективности их применения на реальном производстве в условиях механосборочного цеха ОАО «ОЗММ» методом сверления были изготовлены трубчатые электроды. Характеристики изготовленных электродов, представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Технические характеристики электродов трубчатого сечения изготовленных методом сверления

Наименование	Единица измерения	Значение
Номинальный диаметр	мм	300
Номинальная длина	мм	1800
Диаметром отверстия	мм	30
Термический коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6} (20-520)^{\circ}\text{C}$	1°C	2.2

С использованием изготовленных электродов была проведена кампания плавов, от ремонта до ремонта (Приложение Б) и произведено её сравнение с предыдущей кампанией плавов выполненных на сплошных электродах (Приложение В).

По ходу плавов подвергались контролю следующие параметры: сила тока на электрической дуге, напряжение на электрической дуге, температура футеровки, общее время плавки, расход электроэнергии, вес завалок.

Электрические характеристики работы дуговой сталеплавильной печи контролировались с помощью системы визуализации НПК "ЭЛТА" установленной на ДСП -6-2Н.

Для измерения температуры внутренних точек футеровки по ходу ведения плавки применяли зачеканенные в футеровочный кирпич термопары, которые были установлены таким образом чтобы они находились на 350 мм. выше рабочей поверхности. В качестве термопар были выбраны платинородиевые термопары ТПР 2 821 006. С диапазоном измерения +600 до +1700 °С, схема их установки представлена на рисунке 5.4.

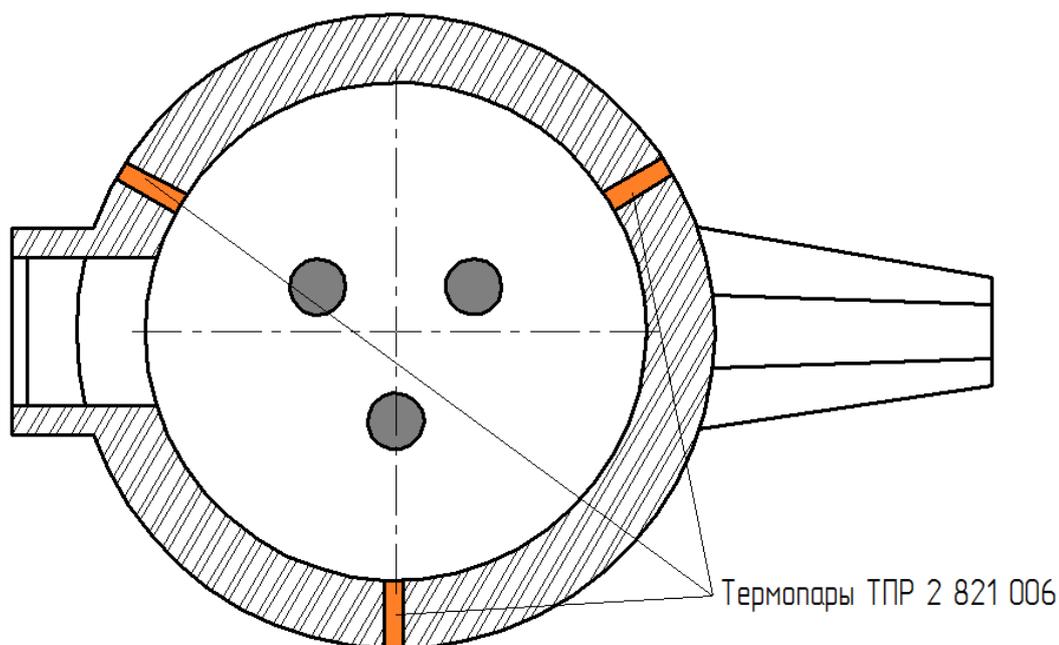


Рисунок 5.4 - Схема установки платинородиевых термопар ТПР 2 821 006 (+600...+1700 °С)

Для сравнительного анализа были выбраны две плавки выполненные методом окисления (сплошной электрод- № пл. 65295, трубчатый электрод- № пл. 65437) и две плавки выполненные методом переплава сплошной электрод- № пл. 65215, трубчатый электрод- № пл. 65319).

Выбранные плавки были выполнены, с одинаковой массой завалки и количества подвалок, без простоев оборудования марка стали 110Г13Л (1гр.).

На основе данных системы визуализации НПК "ЭЛТА" для сравнения токовых нагрузок построены графики зависимости силы тока от времени плавки, которые представлены на рисунке 5.5 и рисунке 5.6.

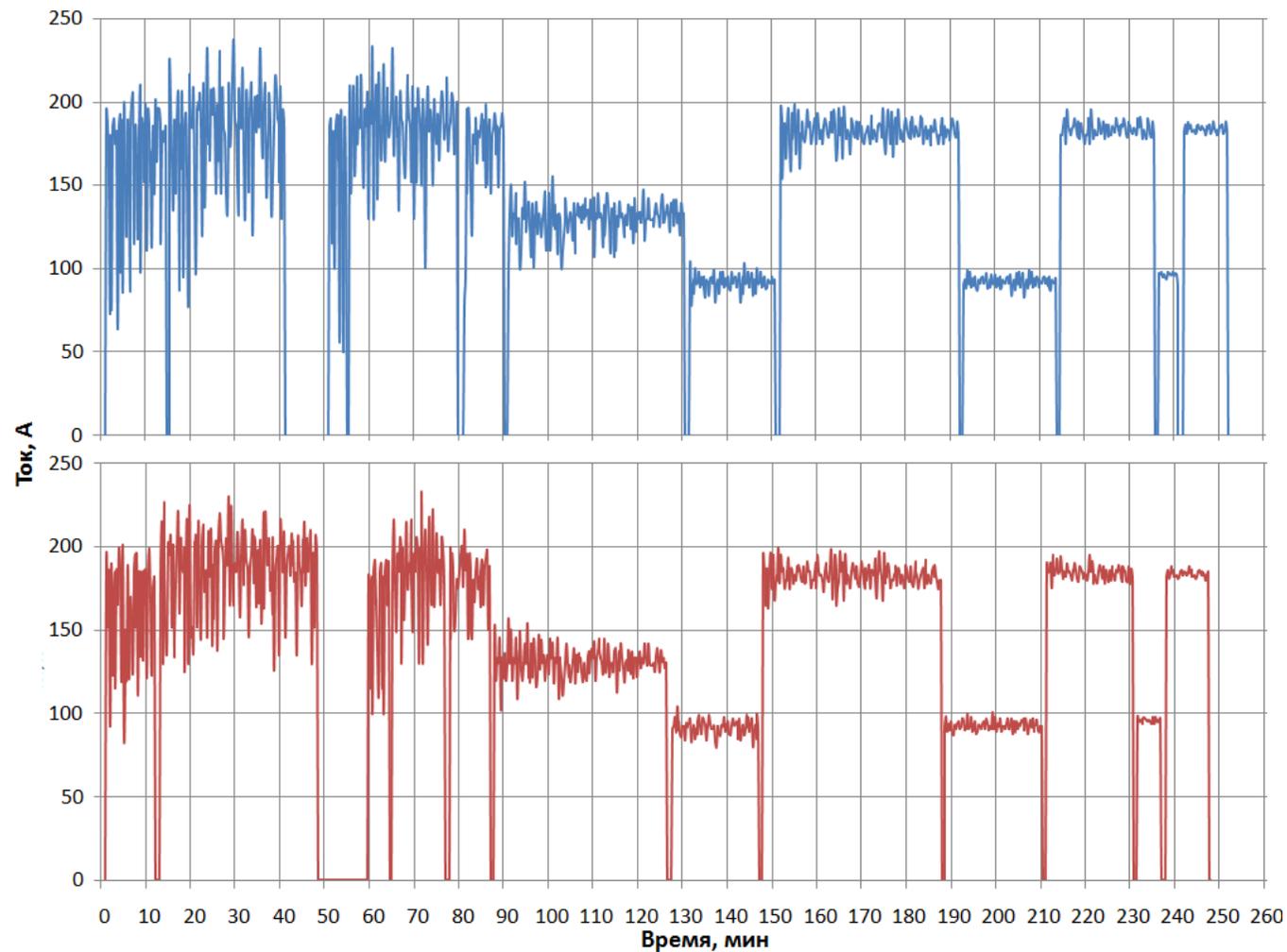


Рисунок 5.5 - График колебаний токовых нагрузок. — - сплошной электрод № пл. 65295; — - трубчатый электрод № пл. 65437

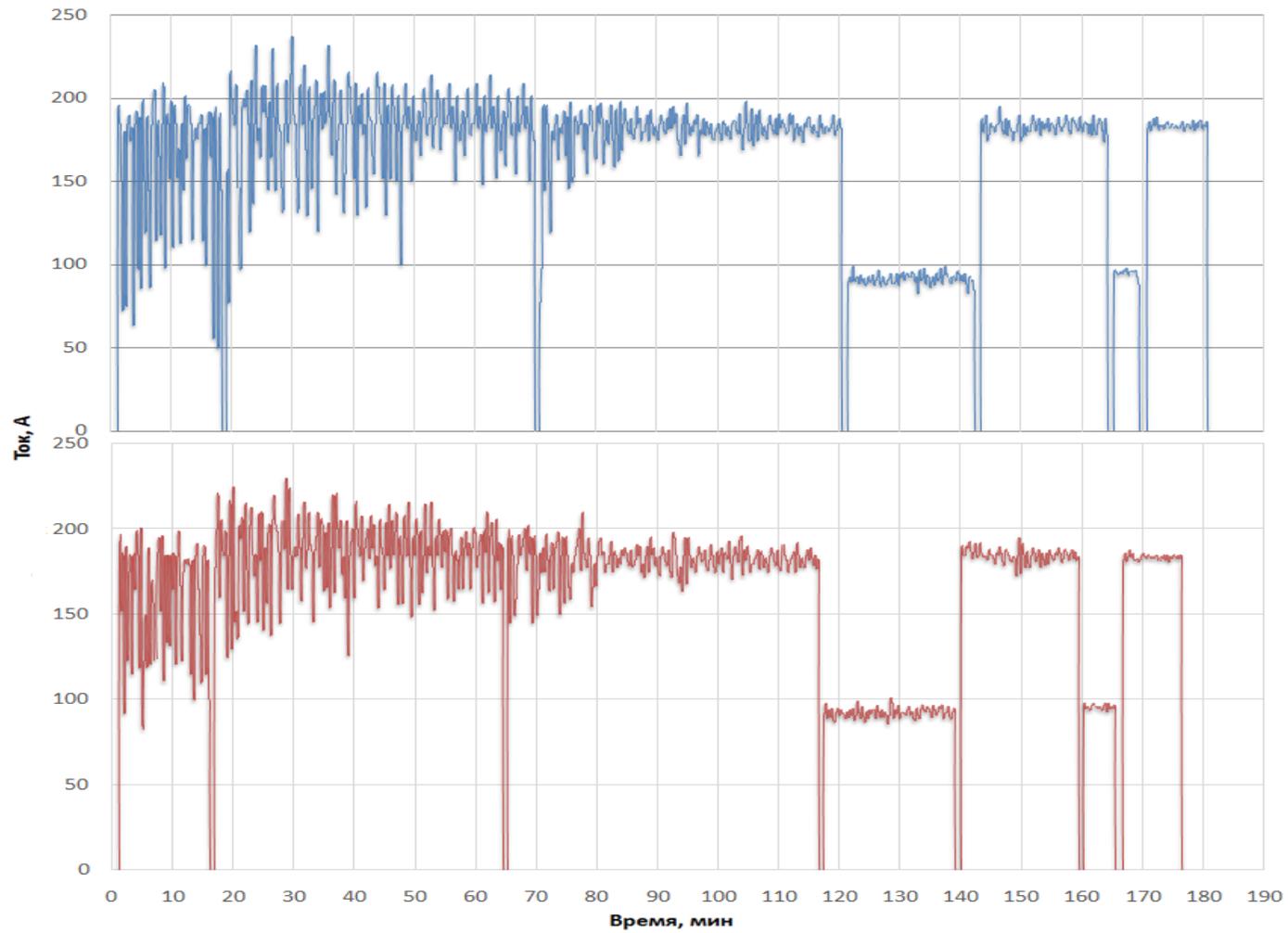


Рисунок 5.6 - График колебаний токовых нагрузок. — - сплошной электрод № пл. 65215; — - трубчатый электрод № пл. 65319

Из полученных графиков (рис. 5.5 и рис. 5.6) видно, что амплитуда токовых колебаний ниже $\approx 9\%$ при использовании трубчатых электродов, особенно это ярко выражено в период расплава металлической шихты. Снижение колебаний тока благоприятно воздействуют на энергетические показатели печи, так как колебания тока повышают расход электроэнергии и снижают производительность из-за простоев при отключении печи токовой защитой.

На рисунке 5.7 и 5.8 представлены графики температуры внутренних точек футеровки по ходу ведения плавки. Из данных графиков видно, что при работе на трубчатых электродах температура внутренней поверхности футеровки снижается в среднем на $26,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждает экспериментальные данные {глава 3}. Такое снижение тепловой нагрузки на футеровку позволит увеличить срок эксплуатации кирпичной футеровки, а также снизить величину тепловых потерь через стены дуговой печи.

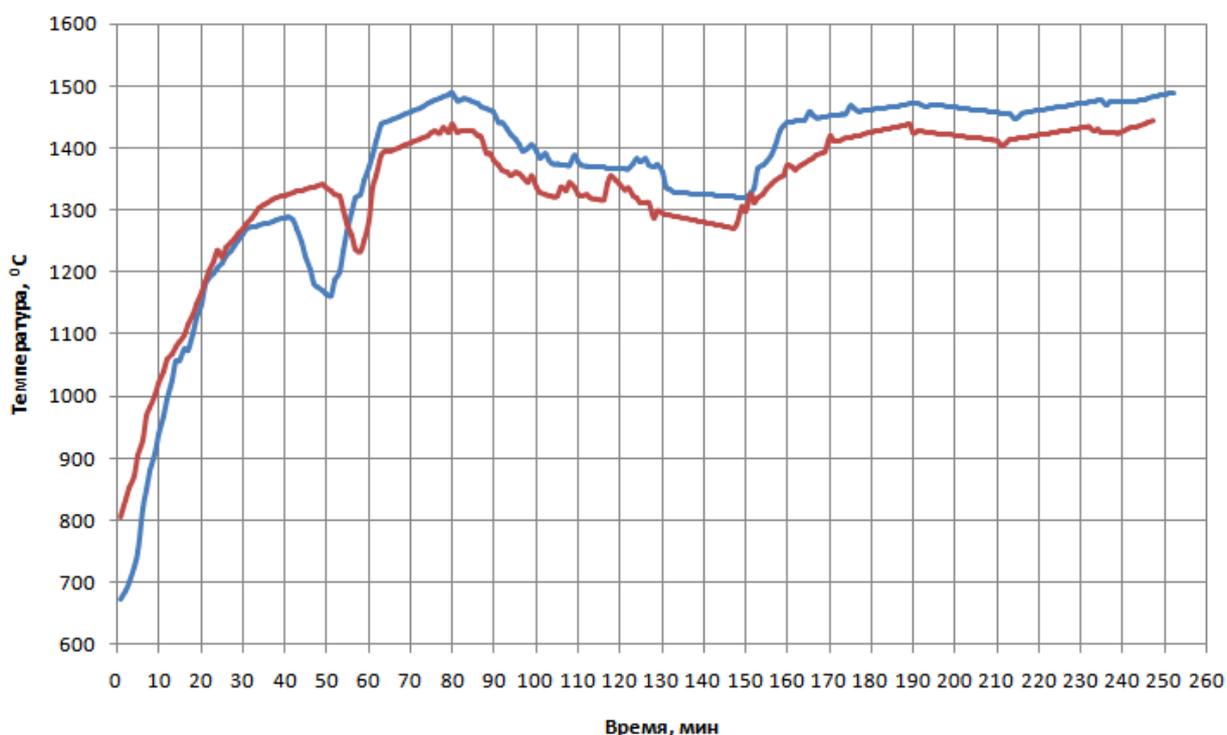


Рисунок 5.7 - График температуры внутренних точек поверхности футеровки по ходу ведения плавки.

— - сплошной электрод № пл. 65295; — - трубчатый электрод № пл. 65437

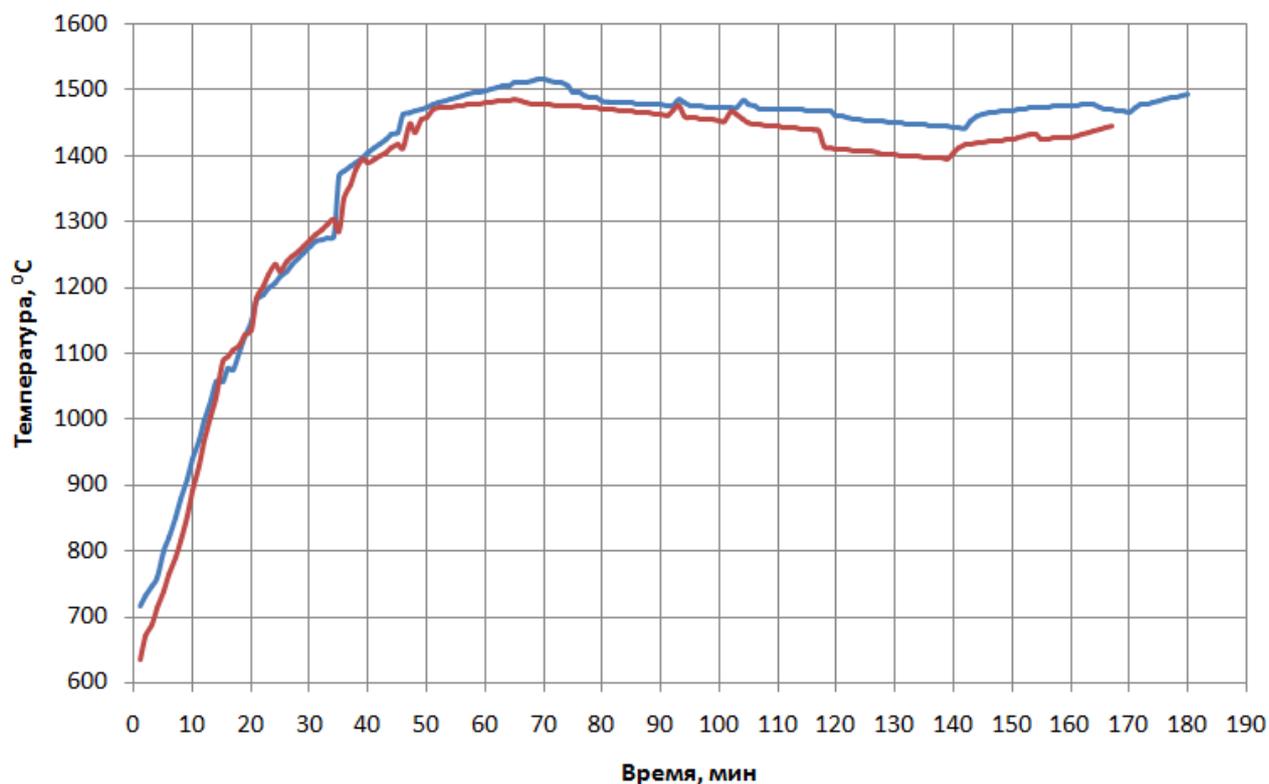


Рисунок 5.8 - График температуры внутренних точек поверхности футеровки по ходу ведения плавки.

— - сплошной электрод № пл. 65215; — - трубчатый электрод № пл. 65319

Основные параметры экспериментальных плавки представлены в таблице 5.5 и 5.6.

Таблица 5.5 - Основные параметры плавки № пл. 65295 и № пл. 65437

Тип электрода	Сплошной электрод № пл. 65295	Трубчатый электрод № пл. 65437
Общее время плавки, мин	252	247,5
Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/т	946	912
Вес жидкого металла, т	7130	7012
Средняя температура футеровки, °C	1360,89	1336,70

Таблица 5.6 - Основные параметры плавки № пл. 65215 и № пл. 65319

Тип электрода	Сплошной электрод № пл. 65215	Трубчатый электрод № пл. 65319
Общее время плавки, мин	180	167
Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/т	711	637
Вес жидкого металла, т	6909	6900
Средняя температура футеровки, °С	1392,7	1359,4

По результатам проведенных испытаний был установлен характер обгорания и эрозии графитированных электродов в печи, представленный на рисунке 5.9, а так же установлен расход электродов по длине и по массе представленный в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Расходов электродов

Тип электродов	Расход по массе, кг/т	Расход по длине, мм/т	Количество поломок электродов за кампанию
Сплошной	9,45	81	9 (сред)
Трубчатый	10,87	101	11

Анализируя установленный характер обгорания и эрозии графитированных электродов и данные расхода электродов по длине и по массе, можно сделать следующий вывод, что увеличение расхода трубчатых электродов (по массе на 15,02 %, по длине на 24,69 %) связано в первую очередь с увеличением поверхности контакта электродов с окисляющими газами за счет наличия отверстия. Однако, повышенный расход трубчатых электродов можно минимизировать путем подачи инертных газов азота или аргона через отверстия электродов.

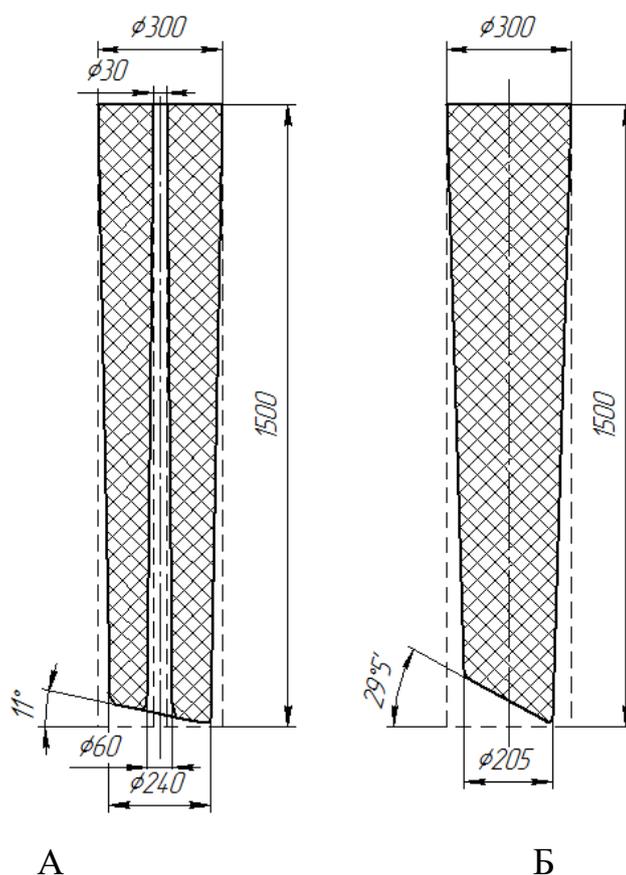


Рисунок 5.9 - Схема эрозии графитированных электродов ЭГ 20.
 А - Трубчатый электрод $d_{отв}/D_{эл} = 0,1$; Б - Сплошной электрод

Проведенный анализ данных (Приложение Б, Приложение В) показал, что применение трубчатых электродов позволяет сократить общее время плавки в среднем на 13 мин, снизить удельный расход электроэнергии в среднем на 65кВт*ч/т, а так же увеличить срок эксплуатации кирпичной футеровки (120 плавков на сплошных 143 плавки на трубчатых электродах).

Выводы по главе 5

Экспериментальным путем установлен расход электродов по длине и по массе, а так же характер обгорания и эрозии графитированных электродов в печи.

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 %.

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 $\mu = 0,1$, 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 видеозображений 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

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».

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. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев. – 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.

10. Лякишев, Н. П. ЭлектрOMETаллургия - динамично развивающаяся отрасль сталеплавильного производства / Н. П. Лякишев // Сталь. - 2006. - №11. - С. 58 - 63.
11. Уточкин, Ю. И. ЭлектрOMETаллургия России: достижения, проблемы, перспективы / Ю. И. Уточкин, А. Е. Семин // ЭлектрOMETаллургия. – 2010. - №12. - С. 2 - 11.
12. В 2010 г. Россия выйдет на пиковые объемы производства стали образца 1990 г. – эксперт [Электронный ресурс] // Металлоснабжение и сбыт. – 2008. – Режим доступа: <http://www.metainfo.ru/ru/news/30464>
13. 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.
14. К вопросу о глубинной продувке сталеплавильной ванны кислородом / Г. А. Лозин // Тр. 7 Конгр. сталеплавильщиков. - М. : Черметинформация, 2003. - с. 287 - 290.
15. Гуляев, М. П. Оптимизация технологий плавки в дуговой печи с донной продувкой инертными газами / М. П. Гуляев // Сталь. - 2002. - № 4. - С. 55 – 58.
16. Смирнова, Е. Ю. Использование тепла отходящих газов ДСП для подогрева шихты / Е. Ю. Смирнова, А. Н. Миронова // ЭлектрOMETаллургия. - 2003. - № 10. - С. 13 - 19.
17. Ми парик, Ф. Дуговая сталеплавильная печь с шахтным подогревателем лома фирмы «Фукс Системтехник» / Ф. Минарик // Сталь. - 2000. - № 3. - С. 3 -5.
18. Лопухов, Г. А. Новая система подогрева лома для дуговой сталеплавильной печи / Г. А. Лопухов // ЭлектрOMETаллургия. - 2000. - № 2. - С. 43 -44.
19. 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.
20. Ахметов, У.Б. Интенсификация плавления шихты в дуговых сталеплавильных печах путем оптимизации управления энергетическим режимом:

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

21. 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.

22. Модульная технология «Динарк» Danieli // Электromеталлургия. - 2007. - № 8. - С. 44 -45.

23. Арджента, П. Выплавка электростали с непрерывной загрузкой горячей шихты / П. Арджента, М. Бианти Ферри // Электromеталлургия. - 2003. - № 5. - С. 27 -34.

24. Ломбардини, Э. Энерготехнологические преимущества работы ЭДП системой Consteel / Э. Ломбардини, П. Арджеита // Электromеталлургия. - 2004.- № 6. - С. 41 -47.

25. Рушно, Э. Электродуговая печь с системой динамического автоматического регулирования фирмы Danieli / Э. Рушно, К. Бергман, С. Олунд // Электromеталлургия. - 2005. - № 8. - С.42 -48.

26. Лапшин, И.В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И. В. Лапшин. - М.: ООО «Квадратум», 2002.-157 с.

27. Смоляренко, В. Д. Энерготехнологические особенности процесса электроплавки стали и инновационный характер его развития / В. Д. Смоляренко // Электromеталлургия. - 2003. - № 11. - С. 12 -19.

28. Лопухов, Г. А. FAST - беспшлаковая система выпуска стали из дуговой печи / Г. А. Лопухов // Электromеталлургия. - 2004. - № 11. - С. 43 -47.

29. Лопухов, Г. А. Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах / Г. А. Лопухов // Электromеталлургия. - 2005. - № 3. - С. 2 -27.

30. Стомахин, А. Я. Электросталеплавильное производство / А. Я.Стомахин // Электromеталлургия. - 2005. - № 3. - С. 35 -37.

31. 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.

32. 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.
33. 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.
34. Огороков, Б. Н. Некоторые особенности дуговых печей как металлургических агрегатов / Б. Н. Огороков, М. М. Крутянский // Электromеталлургия. - 2003. - № 6. - С. 15 – 18.
35. Федина, В.В. Разработка энергосберегающего режима плавления металлизированных окатышей в дуговой сталеплавильной печи с целью повышения эффективности производства : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Федина Виктория Викторовна. - М., 2003. – 205 с.
36. 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.
37. Никольский, Л. Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л. Е. Никольский, В. Д. Смоляренко, Л. Н. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1981.-320 с.
38. 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.
39. 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. - Магнитогорск, 2007. – 154 с.
40. Егоров, А. В. О применении трубчатых электродов в дуговых печах / А. В. Егоров, Л. Е. Никольский, Н.В. Огороков // Электromеталлургия. – 1962. - № 9 - С. 27 - 31.
41. Якшук, Д. С. Влияние состава металлошихты на содержание азота в кордовой стали / Д. С. Якшук, В. В. Эндерс, Е. И. Лейнвебер, Ю. В. Дьяченко //

Сталь. – 1998. - № 11. - С. 29 – 31.

42. 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.

43. 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.

44. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи / А. Д. Свенчанский, М. Я. Смоленский - М.: Энергия, 1970. - 264 с.

45. Кнооп, Р. Управление режимом плавки в дуговой электропечи переменного тока с целью защиты холодильников стен печи / Р. Кнооп, Р. Лихтенбен, З. Келе, Ю. Зинг // Черные металлы. - 1997. - № 7. -С. 8 -13.

46. 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.

47. Лапшин, И. В. Автоматизация технологических процессов дуговой сталеплавильной печи / И. В. Лапшин. - М.: ООО «Квадратум», 2002. — 157 с.

48. 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.

49. 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.

50. Сисоян, Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. Текст / Г. А. Сисоян. - М.: Металлургия, 1974.-304 с.

51. Пирожников, Е. Е. Автоматизация контроля и управления электросталеплавильными установками. Текст / Е. Е. Пирожников, А. Р. Каблуковский - М.: Металлургия, 1974.-208 с.
52. Спелицин, Р. И. Исследование заглубления электрической дуги в жидкую ванну в условиях высокоомощных сталеплавильных печей. Текст / Р. И. Спелицин // Электротехническая промышленность. Сер. Электротермия. - 1975. - № 12. - С. 10 -11.
53. Огороков, Н. В. Дуговые сталеплавильные печи / Н. В. Огороков. - М.: Металлургия, 1971.-344 с.
54. Егоров, А. В. Электроплавильные печи черной металлургии. Текст / А. В. Егоров. - М.: Металлургия, 1985.-144 с.
55. 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.
56. Лисиенко, В. Г. Теплофизика металлургических процессов / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. - М.: Металлургия, 1982.-239 с.
57. Гитгарц, Д. А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микроЭВМ / Д. А. Гитгарц. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-135 с.
58. 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
59. 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.
60. 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.
61. Ткачев, А. С. Экспериментальное изучение влияния полого (трубчатого) электрода на характер горения электрической дуги в дуговой сталеплавильной печи / А. С. Ткачев, А. А. Кожухов, Е. Н. Мельников // Изв. вуз. Черная металлургия. - 2015. - № 3. - С. 207 - 209.

62. Электроды [Электронный ресурс] // *Металлургия*. – 2012. – Режим доступа: <http://metallurgiya.net/elektrometallurgiya/42-yelektrody.html>
63. Электроды дуговых печей // Украинская Ассоциация Сталеплавателей информационный портал о черной и цветной металлургии. - Режим доступа: <http://uas.su/books/2011/dsp/32/razdel32.php>
64. 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.
65. Малиновский, В. С. Техничко-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах / В. С. Малиновский, Ф. Е. Дубинская // *Электрометаллургия*. – 1999. - № 3. - С. 8 - 16.
66. Малиновский, В. С. Дуговые печи нового поколения / В. С. Малиновский, Л. В. Ярных // *Металлургия машиностроения*. – 2001. - № 1.
67. Поволоцкий, Д. Я. *Электрометаллургия стали и ферросплавов* / Д. Я. Поволоцкий, В. Е. Рощин, М. А. Рысс и др. - М.: *Металлургия*, 1974.-551с.
68. Сапиро, В. С. Об уровне и характере облученности футеровки высокоомощной 100-тдуговой сталеплавильной печи. Текст / В. С. Сапиро, С. Н. Тимошенко, А. Б. Чернышев, Г. Г. Житник, Г. С. Легостваев, Е. М. Браверманн // *Известия вузов*. - 1981. - № 3. – С. 63 - 66.
69. 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.
70. Сосонкин, О. М. Особенности теплообмена в дуговой сталеплавильной печи / О. М. Сосонкин, М. В. Шишимиров // *Сталь*. - 2004. - № 8. - С. 34-36.
71. Поволотский, Д. Я. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Д. Я. Поволотский, Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров - М.: *Металлургия*, 1990.-176 с.

72. 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.
73. Bowman, B. Major Developments in arc furnace technology over the last fourdecades / B. Bowman // Inst. Argentino, Paper presented at Aceria, 11 Seminario, BuenosAires, Nov. 26-28. 1997. - 7p.
74. 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.
75. Микулинский, А. С. Определение параметров руднотермических печей на основе теории подобия / А. С. Микулинский. – Л.-М. : Энергия, 1961.-88 с.
76. Гухман, А. А. Физические основы теплопередачи / А. А. Гухман. – Л.-М. : Госэнергоиздат, 1934.
77. Огороков, Н. В. Эффективность работы дуговой печи на трубчатых электродах / Н. В. Огороков, Л. Е. Никольский, А. В. Егоров // Электротермия. - 1962. - № 9. - С. 13 - 18.
78. Свенчанский, А. Д. Определение тепловых потоков дуг в сталеплавильных печах / А. Д. Свенчанский, А. Н. Макаров // Электротермия. - 1982. - № 6 - С. 6 - 8.
79. 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.
80. Самохвалов, Г. В. Электрические печи черной металлургии / Г. В. Самохвалов, Г. И. Черныш. - М. : Металлургия, 1984. – 232 с.
81. Свенчанский, А. Д. Расчёты 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.
82. Невский, А. С. Лучистый теплообмен в печах и топках / А. С. Невский. - М. : Металлургия, 1971. – 440 с.

83. Jasukawa S., Nakamura A. —«Engineering Review», 1975, № 3, September, p. 46 - 51.
84. Макаров, А. Н. Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов : монография / А. Н. Макаров. – Тверь : ТГТУ, 2003.-348 с.
85. Леушин, А. И. Дуга горения / А. И. Леушин. - М. : Metallurgiya, 1979.- 240 с.
86. Игнатов, И. И. Математические модели теплообмена в ДСП / И. И. Игнатов. - Сб.тр. : ВНИИЭТО. - 1983. - С.3-14.
87. Макаров, А. Н. Вопросы теплообмена в электротермических установках / А. Н. Макаров, А. Д. Свенчанский. - М. : Энергоатомиздат, 1983.-С.67-72.
88. 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.
89. Макаров, А. Н. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей / А. Н. Макаров, А. Д. Свенчанский. - М. : Энергоатомиздат, 1992.-96 с.
90. 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.
91. Свенчанский, А. Д. Определение тепловых потоков дуг в сталеплавильных печах / А. Д. Свенчанский, А. Н. Макаров // Электротехническая промышленность. Сер.Электротермия. - 1982. - № 6. - С. 6 - 8.
92. 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
93. 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.

94. 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
95. Казаков, О. А. О математической модели свободногорящей 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.
96. 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
97. Jonas, Alexis Modeling of DC Electric Arc Furnace - Mixing in the Bath / Jonas Alexis, Marco Ramirez, Gerardo Trapaga, Par Jonsson // ISIJ International, Vol.41 (2001), No. 10, pp.1146-1155
98. Bowman, B. The physics of high-current arcs / B. Bowman, G. Jordan, F. Fitzgerald // Iron & Steel Inst., June 1969, pp.798-804
99. Bowman, B. Properties of arcs in DC furnaces / B. Bowman // Electric Furnace Conference Proceedings, 1994, pp.11-120
100. Bowman, B. Effects on furnace arcs of submerging by slag / B. Bowman // Iron and Steelmaking, 1990. No.2
101. 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.
102. Bowman, B. Graphite consumption in arc furnaces / B. Bowman // Electric arc Melting Furnaces Conference, Varna, Bulgaria, May, 1985.
103. Bowman, B. Development of the AC arc furnace / B. Bowman // Xi'an Symposium on Electric Steelmaking Installations, Sept.1993. 14 p.

104. Montgomery, R. W. Commission of the European Communities Pamphlet EUR. No 5716. pp.135.
105. 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
106. 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.
107. 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.
108. 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.

Приложение А

Текст программы для определения угла отклонения электрической дуги

```
Graphics3D 800,600,32,2
SetBuffer BackBuffer()
Global sx=200
Global sy=300
img=CreateImage(sx, sy)
gry=CreateImage(sx, sy)
val=CreateImage(sx, sy)
dsp=CreateImage(sx, sy)
clr=CreateImage(sx, sy)
Const smth=5 ; smazyvaniye po vremeny
Local signal#[smth]
Local last_signal#=0
Local curr_signal#=0
Local last_max#=0
Local last_min#=0
Local last_max_pos#=0
Local last_min_pos#=0
Local prev_last_max#=last_max-1
Local prev_last_min#=last_min+1
cnt=0
Global result#[100], restime#[100], respos=0
Global index[100]
Global amplitude#[100]
Global time#[100]
Global mida#[100]
Global midt#[100]
```

Global da#[100]

Global dt#[100]

Global indexsensibility#=0

Global deltasensibility#=1.5

imgindex=480

work=True

Repeat

; ANALISIRUEM ODIN CADR -----{ { { { 1

If KeyHit(1) Then Exit

; ZAGRUZHAEM CADR IS FAILA

; imgA=LoadImage("Data\Image"+imgindex+".png")

; Otrisovka

If (imgA<>0) Then

CopyRect 20,250,600,400,0,0,ImageBuffer(imgA),BackBuffer()

FreeImage imgA

EndIf

imgindex=imgindex+1

; Vyrezaem nyzhnuyu oblast` is cadra

; img - analuiziruemaya chast` kartinki s kamery (cvetnaya)

CopyRect 300,100,sx,sy,0,0,BackBuffer(),ImageBuffer(img)

; gry - cartinka serogo cveta - srednaya yarcost

gry=Rebuild(img,0,0,sx,sy)

; DrawImage gry,300,100

; Flip

; WaitKey()

; clr

; dsp - cartinka, hranyashaya dispersiyu (beliy - max, cherniy - 0)

s#=Analyze(gry,val,dsp,clr)

```

pos=pos+1
cnt=cnt+1
signal[cnt Mod smth]=s ; zapominaem poslednye SMTH znacheniy
If cnt>smth Then
    curr_signal=0
    For i=0 To smth-1
        curr_signal=curr_signal+signal[i]
    Next
    curr_signal=curr_signal/smth
    Color 0,0,255
    Line pos-1,550-2.8*last_signal+70,pos,550-2.8*curr_signal+70
    s0=s
    ;ds#=curr_signal-last_signal
    last_signal=curr_signal
EndIf
s=curr_signal
pointfound=False
; ishem localnye maksimumy i minimumy
If cnt>smth Then
    If last_max < s Then
        ; LOSE MAX
        last_max = s
        last_max_pos=pos
    ElseIf (last_max_pos+smth <= pos) Then
        ; FOUND MAX
        If (prev_last_max < last_max) Then
            ; QUASIABSOLETE
            Color 255,255,255
            Oval last_max_pos-1,550-2.8*last_max+70-1,3,3

```

```
If respos=0 Then
    respos=1
ElseIf respos=1 Then
    result[respos]=last_max
    restime[respos]=last_max_pos
    respos=2
Else
    result[respos-1]=last_max-result[respos-1]
    result[respos]=last_max
    restime[respos-1]=last_max_pos-restime[respos-1]
    restime[respos]=last_max_pos
    respos=respos+1

    pointfound=True
EndIf
prev_last_max = last_max
last_max = s
last_max_pos=pos
Else
    ; ONE-SIDE LOCAL
    prev_last_max = s

    last_max = s
    last_max_pos=pos
EndIf
EndIf

If last_min > s Then
    ; LOSE min
```

```

last_min = s
last_min_pos=pos
ElseIf (last_min_pos+smth <= pos) Then
; FOUND min
If (prev_last_min > last_min) Then
; QUASIABSOLETE
Color 0,255,0
Oval last_min_pos-1,550-2.8*last_min+70-1,3,3
If respos=0 Then
respos=1
ElseIf respos=1 Then
result[respos]=last_min
restime[respos]=last_min_pos
respos=2
Else
result[respos-1]=last_min-result[respos-1]
result[respos]=last_min
restime[respos-1]=last_min_pos-restime[respos-1]
restime[respos]=last_min_pos
respos=respos+1
pointfound=True
EndIf

prev_last_min = last_min
last_min = s
last_min_pos=pos
Else
; ONE-SIDE LOCAL
prev_last_min = s

```

```

        last_min = s
        last_min_pos=pos
    EndIf
EndIf
EndIf
If pointfound And respos > 2 Then
    max=respos-2
    For i=3 To max
        mida[i]=0
        midt[i]=0
        w#=0
        For j=2 To i
            ;weight function - to increase accurancy, more apriory
information about amplitude law is needed
            g#=(i-2+1+indexsensibility)/(j-2+1+indexsensibility)
            w=w+g
            mida[i]=mida[i]+Abs(result[j])*g
            midt[i]=midt[i]+Abs(restime[j])*g
        Next
        mida[i]=mida[i] / w
        midt[i]=midt[i] / w
        da[i]=Abs(Abs(result[i])-mida[i])/mida[i]
        dt[i]=Abs(Abs(restime[i])-midt[i])/midt[i]
        got=False
        If (da[i]+dt[i])>deltasensibility Then
            got=True
            max = i
            Exit
        EndIf
    EndIf

```

```

Next
If got Then
  Cls
  Color 255,0,255
  tm=0
  For i=2 To max
    tm=tm+restime[i]
    Print "time "+restime[i]+" am "+result[i]+" ma
"+mida[i]+" mt "+midt[i]
    Print " d "+(da[i]+dt[i])+ " da "+da[i]+" dt "+dt[i]+" "
  Next
  Print (max-2)/2.+" hesistations, "+tm+" cadres"
  WaitKey()
EndIf
EndIf
; -----}}}}1
DrawImage clr,300,100
Flip
Forever
End
Function Rebuild(img,x,y,w,h)
; sozdaet cartinky v serom cvete
img2=CreateImage(w,h)
buf=ImageBuffer(img)
buf2=ImageBuffer(img2)
r=%00000000111111110000000000000000
g=%000000000000000000001111111100000000
b=%000000000000000000000000000011111111
LockBuffer(buf)

```

```

LockBuffer(buf2)
For i=1 To w
    For j=1 To h
        argb=ReadPixelFast(x+i,y+j,buf)
        ; Srednaya yarcost
        m=.333 * (((argb And r) Shr 16) + ((argb And g) Shr 16) +
((argb And b) Shr 0) )
        WritePixelFast(i,j,(m Shl 16)+(m Shl 8)+(m Shl 0),buf2)
    Next
Next
UnlockBuffer(buf)
UnlockBuffer(buf2)
Return img2
End Function

Function Analize#(img, img2, img3, img4)
    ; vydelayet oblasti po yarcosti
    buf=ImageBuffer(img)
    buf2=ImageBuffer(img2)
    buf3=ImageBuffer(img3)
    buf4=ImageBuffer(img4)
    r=%00000000111111110000000000000000
    g=%000000000000000001111111100000000
    b=%000000000000000000000000011111111
    h=ImageHeight(img)
    w=ImageWidth(img)
    e=5 ; col-vo pixeley pri osrednenii
    LockBuffer(buf)
    LockBuffer(buf2)
    LockBuffer(buf3)

```

```

LockBuffer(buf4)
s#=0
s0#=0
For i=1+1 To w-1 Step 1
    m0=0
    d0=0
    n=0
For j=h-1 To 2 Step -1
    n=n+1
    ; m - srednyi cvet pixela (is 4 sosebnix)
    m=0
    m=m+(ReadPixelFast(i,j,buf) And b)
    m=m+(ReadPixelFast(i-1,j,buf) And b)
    m=m+(ReadPixelFast(i+1,j,buf) And b)
    m=m+(ReadPixelFast(i,j+1,buf) And b)
    m=m+(ReadPixelFast(i,j-1,buf) And b)
    ;For k=0 To 1-e Step -1
    ;    mm=(ReadPixelFast(i,j+k,buf) And b)
    ;    m=m+mm
    ;Next
    m=m/e
    m0=m0+m
    d=0
    dd=(ReadPixelFast(i,j,buf) And b)-m
    dd=dd*dd
    d0=d0+dd
    d=d+dd
    dd=(ReadPixelFast(i-1,j,buf) And b)-m
    dd=dd*dd

```

```
d0=d0+dd
```

```
d=d+dd
```

```
dd=(ReadPixelFast(i+1,j,buf) And b)-m
```

```
dd=dd*dd
```

```
d0=d0+dd
```

```
d=d+dd
```

```
dd=(ReadPixelFast(i,j+1,buf) And b)-m
```

```
dd=dd*dd
```

```
d0=d0+dd
```

```
d=d+dd
```

```
dd=(ReadPixelFast(i,j-1,buf) And b)-m
```

```
dd=dd*dd
```

```
d0=d0+dd
```

```
d=d+dd
```

```
; For k=0 To 1-e Step -1
```

```
;     dd=(ReadPixelFast(i,j+k,buf) And b)-m
```

```
;     dd=dd*dd
```

```
;     d0=d0+dd
```

```
;     d=d+dd
```

```
; Next
```

```
d=(Sqr(d)/(e-1))*10.    ;    *10 - chtoby dispersiya byla v
```

predelah 0-255

```
; sohranyaem pixeli v kartinku
```

```
WritePixelFast(i,j,(m Shl 16)+(m Shl 8)+(m Shl 0),buf2)
```

```
WritePixelFast(i,j,(d Shl 16)+(d Shl 8)+(d Shl 0),buf3)
```

```
Next
```

```
m0=m0/n
```

```
d0=Sqr(d0/(n-1))
```

scale#=.5 ; dopusk na dispersiyu yarkoy tochki vnutri metalla -
shirina polosy neuchityvaemyh toчек

power#=2. ;

si=0 ;

si2=0 ;

count=0 ; kol-vo NAYDENNYH V RADU yarkih toчек

distort=0 ;

For j=e To h

m=0

mm=(ReadPixelFast(i,j,buf2) And b)-m0

dd=(ReadPixelFast(i,j,buf3) And b)-d0

If mm>d0 Then

; ODNONACHNO YARKAYA TOCHKA

If dd<scale*d0 And (count>(distort^power) Or

distort=0) Then ; Yarkost` - vyshe sredney i kol-vo yarkih toчек vyshe kol-va temnyh

si=si+1

count=count+1

WritePixelFast(i,j,%11111110111111100000000000000000,buf4) ; RED
- METAL

Else

WritePixelFast(i,j,%1111111001111110000000001111111,buf4) ; FIOL
- BORDER OF METAL

EndIf

ElseIf mm<-scale*d0 Then

; ODNONACHNO

If count>0 Then

distort=distort+1

```
EndIf
WritePixelFast(i,j,%11111111000000000111111100000000,buf4)
Else
    If count>0 Then
        distort=distort+1
    EndIf
WritePixelFast(i,j,%11111111000000000000000000000001111111,buf4)
EndIf
Next
s=s+si
Next
s=s/w ;
s0=s0/w
UnlockBuffer(buf)
UnlockBuffer(buf2)
UnlockBuffer(buf3)
UnlockBuffer(buf4)
MaskImage img2,255,255,255
MaskImage img3,255,255,255
MaskImage img4,255,255,255
;Print "Overage: "+s
;WaitKey()
Return s
End Function
```

Приложение Б

Таблица Б1 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом переплава

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65328	переп	2:16	110Г13Л	4386	7050	622	7000			
65337	переп	3:00	110Г13Л	4740	7130	665	1000сл	5500		
65382	переп	2:01	110Г13Л	4068	7774	523	8000			
65442	переп	3:08	110Г13Л	3816	6860	556	2000сл	5000		
65306	переп	2:37	110Г13Л	4260	7473	570	7500			
65309	переп	3:00	110Г13Л	6138	6322	971	6000			
65314	переп	2:00	110Г13Л	3636	7580	480	6500			
65312	переп	1:54	110Г13Л	5400	7063	765	6000			
65354	переп	2:48	110Г13Л	2598	6016	432	6000			
65396	переп	2:29	110Г13Л	4494	7275	618	7500			
65435	переп	2:22	110Г13Л	4518	7250	623	7500			
65440	переп	2:10	110Г13Л	5008	5900	849	500сл	6500		
65307	переп	2:19	110Г13Л	4044	7520	538	700сл	7000		
65311	переп	1:50	110Г13Л	7276	7298	997	7000			
65317	переп	3:20	110Г13Л	7953	7959	999	7500			
65346	переп	1:53	110Г13Л	3900	6463	603	6500			
65356	переп	3:10	110Г13Л	4026	7958	506	8000			
65370	переп	2:11	110Г13Л	4914	7394	665	1500сл	6000		
65400	переп	1:32	110Г13Л	4050	6557	618	6500			

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65430	переп	1:50	110Г13Л	3474	6590	527	6500			
65318	переп	2:24	110Г13Л	4728	7750	610	8000			
65319	переп	2:56	110Г13Л	4392	6900	637	7000			
65333	переп	2:03	110Г13Л	4956	7285	680	7500			

Средняя продолжительность плавки 2:24 час Средняя удельная норма 654 кВт/т

Таблица Б2 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке марганцовистых марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65357	ок	3:56	75Г13Л	7206	8290	869	1500сл	6000		
65371	ок	5:32	75Г13Л	6000	8652	693	7000			
65386	ок	4:15	75Г13Л	5796	7182	807	7500			
65388	ок	3:43	75Г13Л	7953	7953	1000	5000	2000		
65397	ок	3:59	75Г13Л	6258	8484	738	2000	5000		
65308	ок	6:00	75Г13Л	8802	9250	952	7000			отсутствие подвалки, 05:00 до 06:45
65324	ок	5:14	75Г13Л	6732	8512	791	5000	2500		
65325	ок	5:21	75Г13Л	5466	7497	729	4000	4000сл		
65334	ок	4:33	110Г13Л	7788	9770	797	3000	5000		
65349	ок	4:17	110Г13Л	7020	9376	749	7000	1000		

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65353	ок	4:11	110Г13Л	6270	8800	713	3000	4500		
65369	ок	6:00	110Г13Л	7374	8520	865	3000	3000		ожидание подвалки
65375	ок	4:14	110Г13Л	6588	8600	766	7000			
65391	ок	4:10	110Г13Л	6318	8907	709	7500			
65392	ок	4:03	110Г13Л	6216	8785	708	3500	4000		
65421	ок	6:30	110Г13Л	7740	8639	896	1500	6000		Поломка кр№3, слетели канаты
65428	ок	4:15	110Г13Л	6828	8517	802	2500	5000		
65436	ок	3:17	110Г13Л	7580	9541	794	7000			
65443	ок	4:19	110Г13Л	7098	9006	788	8000			
65310	ок	3:30	110Г13Л	6174	7380	837	6000			
65329	ок	5:01	110Г13Л	8742	8836	989	3000	2500	2000	Ожидание додвалки
65313	ок	3:50	110Г13Л	6210	7000	887	3000сл	4500		
65367	ок	4:10	110Г13Л	7398	9306	795	4500	3000сл		
65368	ок	2:53	110Г13Л	5952	8489	701	7300			
65377	ок	4:15	110Г13Л	6780	9118	744	5500	2500сл		
65402	ок	5:12	110Г13Л	6642	9151	726	1000	6500		
65403	ок	6:30	110Г13Л	8286	8836	938	3000	4500		Течь экономайзера, заварка
65407	ок	4:10	110Г13Л	7704	8470	910	4000	3500		
65408	ок	2:54	110Г13Л	5880	8366	703	5500	1500 сл		
65426	ок	4:25	110Г13Л	6132	7500	818	3500	3000		
65437	ок	4:07	110Г13Л	6396	7012	912	5000	2000		

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65315	ок	5:10	110Г13Л	6696	7567	885	1000	5500		
65323	ок	3:58	110Г13Л	6348	7000	907	3000	3000		
65326	ок	3:55	110Г13Л	7122	8880	802	3500	3500		
65327	ок	4:02	110Г13Л	7270	7073	1028	2000 с	4000		
65330	ок	5:30	110Г13Л	6540	7079	924	4000	2000		
65331	ок	3:43	110Г13Л	5040	7020	718	4000	3000сл		
65335	ок	4:36	110Г13Л	5954	8253	721	3000	4500		
65338	ок	4:55	110Г13Л	6540	8500	769	5800	1500		
65339	ок	4:31	125Г13Х2МНЛ	5940	7416	801	7000			
65340	ок	6:00	125Г13Х2МНЛ	7890	10122	779	4500	1500 сл	2000	Ожидание подвалки
65341	ок	5:04	125Г13Х2МНЛ	6120	9412	650	2000 сл	2000	3000	
65342	ок	3:40	125Г18Х2МНЛ	4968	7466	665	7000	7000		
65343	ок	3:22	125Г18Х2МНЛ	5082	6837	743	4000	2500 сл		
65350	ок	6:55	125Г18Х2МНЛ	7860	8500	925	4000	3000		Ожидание подвалки
65351	ок	5:51	125Г18Х2МНЛ	7626	8000	953	3500	3000		Поломка 3 фазы
65358	ок	4:08	125Г18Х2МНЛ	6168	10400	593	1500 сл	8500		

Средняя продолжительность плавки

4:30 час

Средняя удельная норма

802 кВт/т

Таблица Б3 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке углеродистых марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65372	ок	4:00	125Г18Х2МНЛ	6060	8742	693	7500			
65374	ок	4:45	125Г18Х2МНЛ	7452	9772	763	3700 с	3000		
65378	ок	4:48	10Л	7374	9252	797	8200			
65379	ок	3:44	10Л	7950	8860	897	4000	5000		
65380	ок	3:27	10Л	7614	8700	875	4500	4500		
65383	ок	5:32	10Л	7410	8766	845	7000	2000		ожидание форм
65389	ок	4:06	10Л	7866	9937	792	4000	6000		
65393	ок	3:35	10Л	6870	9100	755	5000	1500сл		
65404	ок	2:42	25Л	7206	7103	1015	7499			
65423	ок	3:45	25Л	7206	7242	995	7500			
65424	ок	3:04	25Л	7332	7332	1000	1000сл	6500		
65425	ок	3:30	25Л	6228	7331	850	7500			
65432	ок	4:02	25Л	6438	7200	894	7500			
65438	ок	4:00	25Л	5994	7398	810	7500			
65439	ок	3:47	25Л	6216	7240	859	5000	2500		
65316	ок	3:39	35Л	7860	6110	1286	2500	2000	2000	
65344	ок	4:01	СТ35	7323	7323	1000	4000	3500		
65355	ок	3:46	СТ35	6294	7375	853	4500	3000		
65360	ок	3:26	СТ35	6072	7351	826	6500	1000сл		
65366	ок	3:51	СТ45	6366	7411	859	4000	3000		
65320	ок	4:23	СТ45	7236	8639	838	5500			
65359	ок	3:11	СТ45	5976	7220	828	7500			
65419	ок	3:13	СТ45	5754	7238	795	1000сл	6500		

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65321	ок	4:15	СТ45	6678	7342	910	1000сл	7000		
65336	ок	3:42	СТ45	9564	7154	1337	7500			
65361	ок	3:23	СТ45	6618	8766	755	9000			
65373	ок	3:10	СТ45	6252	8169	765	7000			
65384	ок	7:21	СТ45	10560	7240	1459	8000			ожидание подвалки
65394	ок	3:52	СТ45	6108	7300	837	7500			
65332	ок	2:45	СТ45	5770	7360	784	2800сл	5000		
65347	ок	4:28	СТ45	6124	7000	875	2500	5000		
65352	ок	3:23	СТ45	5526	7500	737	4000	3500		
65348	ок	2:49	СТ45	5658	7110	796	6000	1500		

Средняя продолжительность плавки 3:49 час Средняя удельная норма 901 кВт/т

Таблица Б4 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке низколегированных марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65363	ок	2:57	70ХЛ	6594	7915	833	1200сл	8000		
65365	ок	3:46	70ХЛ	6000	6850	876	1500			
65413	Ок	5:51	70ХЛ	6600	7318	902	3000	4500		грязня шихта

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65364	ок	3:05	70ХЛ	6234	7243	861	7500			
65362	ок	5:03	70ХЛ	7806	8841	883	5000	4000		
65376	ок	3:12	70ХЛ	6108	8201	745	8500			
65387	ок	3:34	70ХЛ	6948	8724	796	9000			
65410	ок	5:29	70ХЛ	7608	9368	812	5000	4500		
65411	ок	3:41	70ХЛ	5928	7887	752	1500	5000		
65418	ок	4:36	70ХЛ	6972	7948	877	4500	3500		
65381	ок	4:50	70ХЛ	7320	7864	931	5000	2500		
65385	ок	4:33	70ХЛ	6918	8432	820	3000	4000		
65390	ок	4:00	70ХЛ	5508	7750	711	3000	5000		
65395	ок	4:14	70ХЛ	6342	7320	866	1000сл	6500		
65405	ок	4:20	35ХМА	7417	7417	1000	2000сл	2000сл		
65406	ок	6:29	35ХМЛ	11700	9245	1266	5000	4500		Отсутствие подвалки
65427	ок	3:36	35ХМА	5094	7337	694	2500сл	4000	1000	
65429	ок	4:47	35ХМЛ	7152	7000	1022	2000сл	4500		
65431	ок	3:45	35ХМА	6600	8329	792	4500	3500		
65441	ок	3:09	35ХМА	5346	7342	728	2000сл	5500		
65398	ок	3:44	35ХМА	6456	7224	894	1200	6000		
65399	ок	5:00	35ХМА	7524	7430	1013	3500	4000		
65412	ок	4:23	35ХМЛ	7530	9174	821	9500			
65409	ок	7:14	35ХМЛ	8586	9400	913	3000	4500		
65414	ок	3:40	17ГС	5916	7459	793	7500			
65415	ок	2:37	17ГС	5328	7408	719	2500сл	5200		

Продолжение Таблицы Б4

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление энергии, кВт*ч	Вес жидкого, т	Удельная норма, кВт/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65420	ок	4:35	17ГС	7212	7473	965	5500	2000		
65416	ок	3:36	17ГС	6120	7300	838	7500			
65417	ок	3:50	17ГС	7860	8996	874	3300сл	6000		
65422	ок	2:50	17ГС	4458	7940	561	3500	4500сл		
65433	ок	4:11	17ГС	7044	7365	956	3000	4000		
65434	ок	4:20	17ГС	5826	7438	783	4000	3500сл		
65305	ок	3:27	17ГС	5586	7539	741	7500			
65312	ок	4:52	17ГС	6372	7480	852	3000	3000	1500л	
65445	ок	3:52	38ХГН	7454	7473	997	7500			

Средняя продолжительность плавки 4:16 час Средняя удельная норма 862 кВт/т

Таблица Б5 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке среднелегированных марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление энергии, кВт*ч	Вес жидкого, т	Удельная норма, кВт/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65443	ок	3:48	34ХН1МА	6486	7285	890	7500			
65444	ок	4:12	34ХН1МА	7134	7405	963	7500			
65446	ок	4:37	40ХН2МА	7272	7200	1010	7500			
65447	ок	4:51	40ХН2МЛ	7602	8804	863	1000сл	8000		
65448	ок	4:49	40ХН2МА	8116	7100	1143	7500			

Средняя продолжительность плавки 4:21 час Средняя удельная норма 978 кВт/т

Приложение В

Таблица В1 - Работа печи ДСП 6-2Н на сплошных электродах методом переплава

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65201	переп	2:26	110Г13Л	5641	6300	895	6500			
65202	переп	4:03	110Г13Л	6978	7318	954	7500			Поломка кр №21 отсутствие подвалки
65203	переп	2:54	110Г13Л	4146	7896	525	7500			
65206	переп	2:33	110Г13Л	5010	8533	587	6500			
65207	переп	2:30	110Г13Л	5106	7800	655	6500			
65215	переп	3:00	110Г13Л	4909	6909	711	7000			
65216	переп	2:52	110Г13Л	6540	7967	821	8000			
65217	переп	2:54	110Г13Л	4752	6760	703	2000 слд	6000		
65219	переп	2:15	110Г13Л	4848	6910	702	7000			
65220	переп	1:51	110Г13Л	4782	7350	651	6500			
65221	переп	2:50	110Г13Л	5016	7144	702	7000			
65226	переп	2:00	110Г13Л	4368	7201	607	6810			
65229	переп	2:41	110Г13Л	4920	7350	669	7500			
65230	переп	2:13	110Г13Л	4806	6980	689	1000 сл	7000		
65231	переп	2:11	110Г13Л	5124	7100	722	7500			
65244	переп	2:42	110Г13Л	4980	7270	685	7500			
65245	переп	2:40	110Г13Л	3918	6800	576	7000			
65246	переп	2:17	110Г13Л	4938	7700	641	1000 сл	7000		
65251	переп	2:00	110Г13Л	5580	6350	879	6000			

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65264	переп	3:10	110Г13Л	6816	7586	898	2000 сл	5000		
65270	переп	1:34	110Г13Л	3378	8000	422	8000			
65278	переп	2:23	110Г13Л	4866	6800	716	2000 сл	5000		
65283	переп	2:36	110Г13Л	4770	6030	791	6000	1000 сл		
65291	переп	2:00	110Г13Л	4908	8084	607	1500 сл	6500		
65205	переп	4:15	130Г13Х2Л	5102	6261	815	7000			отсутствие подвалки
65222	переп	2:32	130Г13Х2Л	4674	6730	695	6500			

Средняя продолжительность плавки - 2:35 час

Средняя удельная норма 704 кВт*ч/т

Таблица В2 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке марганцовистых марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65209	ок	4:32	75Г13Л	8412	7821	1076	4000	3000		
65227	ок	3:21	75Г13Л	7236	7943	911	5000	2000		
65281	ок	4:00	75Г13Л	6480	8404	771	7500			
65296	ок	4:47	75Г13Л	8004	8500	942	5000	2500		
65208	ок	6:22	110Г13Л	8690	8855	981	3500	4000		Прогар экономайзера на 3 фазе
65211	ок	6:39	110Г13Л	9012	8695	1036	4000	5000		Не отводится свод

Номер плавки	Вид плавки	Продолжитель- ность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65214	ок	5:00	110Г13Л	8730	8272	1055	3500	4000		
65210	ок	6:37	110Г13Л	9400	9400	1000	3800	800	3700	
65218	ок	4:12	110Г13Л	7200	8360	861	4500	3000		
65224	ок	4:43	110Г13Л	7584	8869	855	5500	2000		
65225	ок	4:17	110Г13Л	7388	9353	790	5500	2500		
65228	ок	6:18	110Г13Л	7446	8698	856	3000	3000	15000	ожидание подвалки
65232	ок	4:03	110Г13Л	8142	8941	911	7000	1000		
65234	ок	5:11	110Г13Л	8346	8999	927	5000	2500		
65235	ок	4:20	110Г13Л	7566	8370	904	6000			
65238	ок	4:03	110Г13Л	6396	9941	643	1000 сл	7500		
65239	ок	5:38	110Г13Л	7722	9450	817	4000	4000		
65240	ок	5:24	110Г13Л	8220	9071	906	3000	3000		
65241	ок	6:10	110Г13Л	9182	9382	979	2500	1500	4500	ожидание форм, не вращается рольганг
65249	ок	6:04	110Г13Л	8754	9067	965	4000	2500	2000 сл	16:35-18:00 Кр.№32 сгорел гидр.толкатель
65250	ок	4:40	110Г13Л	8784	8926	984	5000	2500сл		
65252	ок	3:44	110Г13Л	8034	9950	807	4000	4000		
65269	ок	3:35	110Г13Л	7506	9300	807	5500	2500сл		
65271	ок	5:36	110Г13Л	9036	8789	1028	3500	4000		
65294	ок	4:00	110Г13Л	6198	7400	838	2500 сл	4000		
65295	ок	4:12	110Г13Л	6741	7130	945	4500	2500		
65213	ок	5:00	125Г18Х 2НМЛ	8706	9100	957	4000	3500		

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65254	ок	5:23	125Г18Х2НМЛ	5790	9859	587	2000	4500		
65277	ок	6:50	125Г18Х2НМЛ	11038	9250	1193	4000	3500		отрыв стопорной пробки на ковше №5, кантовка обратно в печь
65290	ок	5:21	125Г18Х2НМЛ	9788	10543	928	5000	2000	2500	

Средняя продолжительность плавки – 5:00 час

Средняя удельная норма – 921 кВт/т

Таблица В3 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке углеродистых марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65212	ок	3:47	10Л	7986	8677	920	9000			
65223	ок	3:54	10Л	8724	9764	893	3000	6000		
65247	ок	4:20	10Л	7814	9560	817	2500	5500		Ток.непров. шихта, поломка 2 и 3 фазы
65259	ок	5:25	10Л	9324	10199	914	4500	6000		
65265	ок	4:20	10Л	8340	9198	907	4000	4500		
65204	ок	3:51	15Л	7938	6780	1171	7000			
65236	ок	5:38	35Л	8586	8178	1050	8500			2:00-3:30 отсутствие завалки
65258	ок	3:35	СТ35	8640	7273	1188	5000	2500 сл		
65184	ок	3:25	СТ45	6108	7229	845	1000 сл	6500		

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление энергии, кВт*ч/т	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65185	ок	4:28	СТ45	10092	8663	1165	3500	4000		
65186	ок	7:23	СТ45	9636	9150	1053	4000	4300		22:30-0:30 з-й электрод не берет дугу
65187	ок	4:30	СТ45	7470	6768	1104	2000 сл	5000		
65188	ок	3:45	СТ45	7146	8178	874	6000	2500		
65189	ок	4:00	СТ45	9570	8155	1174	5000	3000		
65190	ок	3:41	СТ45	6600	8160	809	6850			
65191	ок	3:57	СТ45	6516	7220	902	7500			
65192	ок	3:14	СТ45	6138	7229	849	3500	1500	3200	
65193	ок	2:43	СТ45	5330	7220	738	7500			
65194	ок	4:12	СТ45	7122	7295	976	1500сл	6000		
65195	ок	2:40	СТ45	5724	7300	784	7500			
65196	ок	3:24	СТ45	5466	7200	759	7500			
65197	ок	3:46	СТ45	6512	7200	904	5500	2000		
65198	ок	2:45	СТ45	5544	7200	770	5000	2500		
65199	ок	2:21	СТ45	5292	7150	740	7500			
65200	ок	4:56	СТ45	6642	7356	903	3500	4000сл		
65243	ок	2:48	СТ45	6186	7322	845	5500	2000сл		
65272	ок	3:03	СТ45	5670	7350	771	7500			
65284	ок	3:27	СТ45	4896	7347	666	7500			
65285	ок	2:35	СТ45	6510	7826	832	8000			
65292	ок	3:12	СТ45	6360	7314	870	1000сл	6500		
65293	ок	4:03	СТ45	7476	8000	935	3000	2000	3500	

Средняя продолжительность плавки – 3:50 час

Средняя удельная норма – 907 кВт/т

Таблица В4 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке низколегированных марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Погрешение эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65261	ок	4:13	17ГС	8604	7788	1105	1000 сл	7000		
65298	ок	5:46	17ГС	7483	7525	994	4000	3500		
65299	ок	4:00	17ГС	7500	7310	1026	1000 сл	6500		
65275	ок	3:24	65Г	7338	7351	998	3500	1500 сл	2500	
65276	ок	4:55	65Г	8082	7300	1107	2500	5000		
65237	ок	4:48	20ФЛ	8586	9043	949	5000	4000		
65242	ок	5:00	20ФЛ	7578	9071	835	8000			
65256	ок	4:09	20ФЛ	7410	9351	792	5000	2500	2000 сл	
65263	ок	3:22	20ФЛ	7512	9165	820	4500	5000		
65267	ок	4:10	20ФЛ	7200	8841	814	2500	4500	2000 сл	
65273	ок	5:07	20ФЛ	8382	9067	924	3000	3200 сл		
65280	ок	6:00	20ФЛ	10026	9090	1103	4000	3500		
65282	ок	6:47	20ФЛ	8904	9076	981	3000	5000	1000 сл	порыв рукова, замена
65248	ок	4:18	70ХЛ	9528	8836	1078	1500 сл	5000	2500	
65253	ок	3:20	70ХЛ	6492	7330	886	1000	6500		
65260	ок	4:06	70ХЛ	7974	7793	1023	8000			
65262	ок	5:15	70ХЛ	7344	7400	992	5000	2500		
65279	ок	5:27	70ХЛ	9240	9208	1003	3500	2500	3500	
65289	ок	4:10	70ХЛ	11796	8950	1318	3500	2000		
65297	ок	6:12	70ХЛ	9504	9513	999	4000	3500	2000 сл	
65255	ок	5:10	35ХМЛ	11160	8031	1390	4000	3000	1000	ожидание подвалки

Продолжение таблицы В4

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65257	ок	5:00	35ХМЛ	7338	7523	975	4000	3500 сл		
65266	ок	4:11	35ХМЛ	8796	9861	892	2000	4500	2000	
65268	ок	4:04	35ХМЛ	8136	8665	939	5000	4500		
65274	ок	3:36	35ХМЛ	5934	7989	743	6500	1500 сл		
65288	ок	4:10	35ХМЛ	8166	8470	964	4000	3000	1500 сл	
65285	ок	3:37	40X	7206	7497	961	1000 сл	3500	3500	
65286	ок	5:48	40X	7410	7318	1013	4000	3500		

Средняя продолжительность плавки – 4:38 час

Средняя удельная норма – 987 кВт/т

Таблица В5 - Работа печи ДСП 6-2Н на трубчатых электродах методом окисления при выплавке среднелегированных марок стали

Номер плавки	Вид плавки	Продолжительность, час:мин	Марка стали	Потребление эл.энергии, кВт*ч	Вес жидкого, кг	Удельная норма, кВт*ч/т	Вес завалки, кг			Причина увеличения времени плавки
							1	2	3	
65300	ок	3:35	34ХН3МА	7068	7412	954	7500			
65301	ок	6:08	34ХН3МА	7834	7415	1057	7500			
65302	ок	4:55	34ХН3МА	7664	7381	1038	5500	2000сл		перегрев трансформатора
65303	ок	3:23	42CrMo4V	7350	7336	1002	3500	4000		
65304	ок	3:56	42CrMo4V	6640	7459	890	4000	3500сл		

Средняя продолжительность плавки – 4:23 час

Средняя удельная норма – 988 кВт/т

Утверждаю:
Главный инженер
ОАО «Оскольский завод
металлургического машиностроения»
А.А. Пупцев
«18» _____ 2013г

АКТ

Технических испытаний

В период с 07.08.2013г. по 23.09.2013г. на плавильном участке ЛЦ ОАО «ОЗММ» были проведены испытания трубчатых электродов с диаметром внутреннего отверстия 30 мм. Опытная партия электродов была испытана на ДСП №6.

В результате испытаний установлено, что применение трубчатых электродов позволяет сократить общее время плавки в среднем на 13 мин., снизить удельный расход электроэнергии в среднем на 65 кВт/т, а так же увеличить срок эксплуатации кирпичной футеровки с 120 до 143 плавов.

Удельный расход электродов составил 10,87 кг/т.

Для более тщательной оценки эффективности применения трубчатых электродов требуется проведение дополнительных промышленных испытаний.

Начальник литейного цеха

Аникин Е.Н.

Утверждаю:
Главный инженер
ОАО «Оскольский завод
металлургического машиностроения»
Пупцев А.А.
« 18 » _____ 2013 г.

АКТ

об использовании теоретических и экспериментальных результатов исследований аспиранта Ткачева А.С., направленных на решение проблемы снижения энергозатрат и повышения производительности выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах, выносимых на защиту кандидатской диссертации

ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения» подтверждает, что полученные Ткачевым А.С. в рамках выполнения НИОКР результаты о перспективности применения трубчатых (полых) электродов, опубликованные в научно-технических журналах, а именно влияние трубчатых электродов на режим горения электрической дуги и характер теплообмена в рабочем пространстве печи.

Печисленные результаты на наш взгляд являются существенным вкладом в развитие процессов получения стали в дуговых сталеплавильных печах и позволяют предложить энерготехнологический режим выплавки стали обеспечивающий сокращение времени плавки под током и снижение удельного расхода электроэнергии.

Полученные Ткачевым А.С. результаты ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения» планирует использовать в производстве.

Начальник литейного цеха



Аникин Е.Н.



**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КМАРУДОРЕМОНТ»**

309182, Белгородская обл., г.Губкин, Южные Коробки
Код предприятия 3672
Станция Губкин юго-восточной ж.д. код 438001
Южные Коробки
Р/с 407 028 106 070 020 1006 62
в Белгородское отделение №8592 ОАО
«Сбербанк России»
К/с 301 018101 000 000 00 633
ОКПО 5766250 ОКОНХ 14291
ИНН 3127000046 / КПП 312701001

тел. (47241) 9-62-42
тел./факс (47241) 5-54-15, 5-12-14
E-mail: Kmamarket@mail.ru

АКТ

об использовании теоретических и экспериментальных результатов исследований аспиранта Ткачева А.С., направленных на решение проблемы снижения энергозатрат и повышения производительности выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах, выносимых на защиту кандидатской диссертации

ЗАО «КМАрудоремонт» рассмотрев полученные Ткачевым А.С. в рамках выполнения НИОКР результаты изучения влияния полых (трубчатых) электродов на тепловые и технологические особенности ведения плавки в дуговой сталеплавильной печи, пришли к выводу, что выполненные исследования позволяют предложить энерготехнологический режим выплавки стали, обеспечивающий сокращение времени плавки под током и удельного расхода электроэнергии, являются существенным вкладом в развитие процессов получения стали в дуговых сталеплавильных печах.

Полученные Ткачевым А.С. результаты ЗАО «КМАрудоремонт» планирует использовать в производстве.

Генеральный директор



А.А. Дробышев