

На правах рукописи



Костылева Елизавета Марковна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ**

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЧЕЛЯБИНСК- 2020

Работа выполнена на кафедре информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Логиновский Олег Витальевич**
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Куликов Геннадий Григорьевич** доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры автоматизированных систем управления ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
Баркалов Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, заведующий кафедрой управления ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «28» декабря 2020 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007 главного корпуса.

С содержанием диссертации можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Сведения о защите, диссертация и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ЮУрГУ: <https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/kostyleva-elizaveta-markovna>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 265-62-05.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Голлай А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время существует множество промышленных агрегатов, работающих в черной, цветной металлургии и химической промышленности, в которых в качестве источников тепловой энергии используются электрические дуги. Это могут быть как свободно горящие, так и обжатые электрические дуги постоянного или трехфазного переменного тока.

На электрическую дугу как легкоподвижный проводник с током существенное влияние оказывают внешние магнитные поля, возникающие от тока, протекающего через саму дугу, от других токов, проходящих: через параллельно горящие дуги, токоподводящие электроды к ним, через жидкий металл, шихту, токоподводы и пр. От рода тока, характера и интенсивности электромагнитных взаимодействий зависит форма дуги и ее динамическое поведение, которое в свою очередь существенно влияет на тепловую работу печи, износ электродов, огнеупорных керамических материалов и в целом – на технико-экономическую эффективность работы агрегатов. Знание характера сил, действующих на дугу, ее положения и поведения является важным при конструировании и эксплуатации печей, повышения эффективности управления и автоматизации их работы. Экспериментальными и теоретическими исследованиями электрических дуг в разное время занимались отечественные М.Ф. Жуков, А.И. Леушин, Г.А. Сисоян, А.Н. Макаров, Н.Н. Рыкалин, Ю.М. Миронов, Н.И. Бортничук, М.М. Крутянский, В.С. Малиновский, С.М. Нехамин и зарубежные ученые А.К. Mandal, R.K. Dishwar, O. P.Sinha, J.J. Jeong, T. Kim, S. Kim, H.E. Weber, H.A. Stine, V.R. Watson и др. Однако многие вопросы, связанные с поведением дуг изучены недостаточно полно. В литературе представленные данные порой противоречивы, не достаточно полно проанализированы системные связи, возникающие с учетом особенностей функционирования дуговых печей. Малоизучено поведение одиночной дуги при внешних магнитных полях при выборе тех или иных токоподводов в промышленном агрегате. Не до конца понятно, чем определяется характер электромагнитного взаимодействия нескольких параллельно горящих дуг постоянного или трехфазного переменного тока, суммарные тепловые потоки от этих дуг на тепловоспринимающие поверхности и обрабатываемые материалы. Изучение этих практических важных вопросов на промышленных или опытных установках технически сложно, дорого и часто невозможно по многим другим самым различным причинам. В этой связи особенно важно систематизировать и обобщить существующие разработки и новые исследования в области создания моделей и алгоритмов поведения дуг и их теплового излучения в условиях работы многоэлектродных дуговых печей. Важно также создание специального математического, алгоритмического обеспечения, его реализация в виде компьютерных программ и дальнейшего анализа информации с использованием методов ее обработки с целью использования в автоматизированных промышленных системах.

Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка моделей и алгоритмов для определения характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых печах и создание на их основе специального математического и алгоритмического обеспечения, включающего анализ поведения магнитного поля вблизи электрических дуг, электромагнитных сил, действующих на них и влияющих на форму и поведение столбов дуг и позволяющего повышать эффективность управления динамикой нагрева обрабатываемого металла.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих моделей агрегатов, для работы которых используется электрическая дуга.
2. Созданы, модели и алгоритмы по определению:
 - напряженности магнитного поля вблизи отдельной дуги, а также параллельно горящих дуг постоянного или трехфазного переменного тока;
 - основных электромагнитных сил, действующих на электрическую дугу в условиях параллельно горящих дуг постоянного или трехфазного переменного тока;
 - формы среднего положения осей параллельно горящих электрических дуг постоянного или трехфазного переменного тока при их электромагнитном взаимодействии;
 - теплового излучения, падающего на горизонтальную поверхность, от дуг трехфазного переменного тока с учетом их формы.
3. На основе разработанных моделей создано алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования тепловосприятости ванны дуговой печи при разных режимах горения нескольких электрических дуг.
4. С использованием разработанного алгоритмического и программного обеспечения для действующих промышленных металлургических агрегатов, работающих на постоянном или трехфазном переменном токе, проведено исследование поведения: напряженности магнитного поля, локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на дугу, формы осей столбов электрических дуг, их теплового излучения на горизонтальную поверхность привязки дуг.
5. Установлена адекватность модели излучения дуг на основе экспериментальных данных, полученных на промышленной дуговой печи.

Объектом исследования являются режимы функционирования многоэлектродных дуговых печей.

Предметом исследования является взаимодействие магнитных полей и основных электромагнитных сил в различных режимах функционирования многоэлектродных дуговых печей.

Методы исследования. При выполнении работы применялись методы вычислительной математики и теории алгоритмов. В теоретических исследованиях применялись методы векторной алгебры и аналитической геометрии. Созданное программное обеспечение основывалось на использовании известных методов численного интегрирования и поиска минимума функций многих переменных. Программное обеспечение, проведение компьютерного моделирования и проверка адекватности моделей осуществлялось с применением средств разработки приложений *Matlab* и пакета *MathCAD*.

Тематика работы. Содержание диссертации соответствует следующим пунктам области исследования Паспорта специальности ВАК РФ «05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)»:

п.2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

п.12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

Научная новизна работы и теоретическая значимость

1. Систематизированы имеющиеся и разработаны новые модели для определения напряженности магнитного поля, основных локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на дуги и тепловых потоков излучения на горизонтальную поверхность от горящих дуг постоянного или трехфазного переменного токов.
2. Впервые получена аналитическая формула и приближенный алгоритм расчета для определения напряженности магнитного поля вблизи нескольких электрических дуг постоянного или переменного токов, горящих на горизонтальную поверхность.
3. Для основных промышленных металлургических агрегатов с использованием компьютерного моделирования проведено исследование основных характеристик электромагнитного взаимодействия электрических дуг и их теплового излучения при горении на горизонтальную поверхность.
4. Впервые создан численный эвристический алгоритм для нахождения формы осей столбов при электромагнитном взаимодействии двух или трех дуг, по которым протекают постоянные токи, текущие параллельно в одном или противоположных направлениях, или трехфазные переменные токи при горении дуг на горизонтальную поверхность.
5. Получено распределение теплового потока по горизонтальной поверхности при привязке на нее трех электрических дуг трехфазного тока с учетом их электромагнитного взаимодействия.

Теоретическая значимость работы состоит в систематизации существующих математических моделей, в изучении существенных связей, влияющих на тепловое излучение дуг при обработке материалов в агрегатах электрометаллургии. Внесен вклад в понимание механизма электромагнитного взаимодействия трех дуг трехфазного переменного тока. Разработаны эвристические алгоритмы нахождения формы осей столбов двух или трех электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии с точностью достаточной для промышленных систем управления. Предложен метод расчета тепловых потоков, падающих на горизонтальную поверхность от нескольких электрических дуг с учетом их поведения при электромагнитном взаимодействии.

Практическая значимость

Создано алгоритмическое и программное обеспечение, по нахождению в условиях работы промышленных агрегатов, работающих на постоянном или трехфазном переменном токе, электромагнитных сил, действующих на дуги и распределения теплового потока, падающего на горизонтальную поверхность, а также формы осей столбов параллельно горящих электрических дуг.

Полученное программное обеспечение может использоваться при проектировании многоэлектродных дуговых и плазменных металлургических печей для правильного выбора диаметра распада электродов и диаметра ванны жидкого металла. Предложенные алгоритмы позволяют совершенствовать существующие методы принятия решения по определению положения электрических дуг, в системах автоматизированного регулирования их тепловой работы. Знание тепловых потоков дает дополнительную возможность проводить более достоверную оценку динамики нагрева шихты и более качественно прогнозировать стойкость футеровки или теплосъем водоохлаждаемых панелей вблизи горящих дуг при разных технологических режимах в агрегатах с

несколькими параллельно горящими дугами. Разработанные модели, алгоритмы и программное обеспечение внедрены в практику работы ООО РМЗ «НИХАРД-СЕРВИС» (г. Златоуст).

Достоверность и обоснованность результатов работы базируется на использовании проверенных на практике моделей, а также сравнении полученных результатов с известными из научно-технической литературы экспериментальными данными и результатами экспериментальных исследований выполненных автором на промышленной дуговой печи.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XIV Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Челябинск, 2010), научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2011, 2014), Международной конференции «Информационные технологии и системы», (Челябинск, 2012, 2013, 2014, 2015), Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (г. Екатеринбург, 2012), II Всероссийская научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2013) с международным участием «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (г. Екатеринбург, 2013), научной конференции аспирантов и докторантов Южно-Уральского государственного университета (национально-исследовательского университета) (г. Челябинск, 2018, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 33 работы [1-33], в том числе девять [1-9] публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК, три проиндексированы в международной базе SCOPUS [10-12], получены две государственные регистрации программ для ЭВМ [13, 14]. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию включены только результаты, полученные ее автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из **152** наименований, изложенных на **173** страницах машинописного текста, включая **77** рисунков, **6** таблиц и **4** приложения.

На защиту выносятся следующие научные положения и результаты.

1. Результаты анализ используемых на практике, моделей и методов, описывающих электромагнитные и тепловые характеристики электрических дуг постоянного и переменного тока в промышленный агрегат, работающих в различных режимах.
2. Модели и алгоритмы для нахождения: напряженности магнитного поля вблизи трех дуг дуговой сталеплавильной печи (ДСП); локальных сил, действующих на элемент дуги и среднеинтегральных сил, действующих на дугу; формы осей столбов дуг в зависимости от их количества и рода используемого тока; распределения теплового потока по поверхности ванны при горении одной или трех дуг.
3. Методика обработки информации для определения среднего теплового потока излучения от нескольких параллельно горящих на горизонтальную поверхность дуг постоянного или переменного токов с учетом их формы.
4. Специальное программное обеспечение для определения: формы осей столбов нескольких параллельно горящих дуг постоянного или трехфазного переменного тока при их электромагнитном взаимодействии; распределения среднего теплового потока от нескольких параллельно горящих на горизонтальную поверхность электрических дуг постоянного или переменного токов при динамически меняющихся технологических условиях промышленной дуговой печи.

5. Полученные на основе компьютерного моделирования динамические нормированные поля напряженности магнитного поля вблизи трех дуг трехфазного переменного тока; годографы бегущего магнитного поля в разные моменты периода; положения локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на дугу со стороны других токов; положение осей столбов двух или трех, параллельно горящих на горизонтальную поверхность дуг постоянного или переменного токов в зависимости от относительного расстояния между ними; распределение тепловых потоков по поверхности ванны от нескольких параллельно горящих на горизонтальную поверхность наклонных дуг постоянного или трехфазного переменного токов в зависимости от их длины и расстояния между ними.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи работы, указан объект и предмет, а также используемые методы исследования, представлены сведения о научной новизне, теоретической и практической значимости, данные об апробации работы, публикациях и положениях, выносимых на защиту.

В первой главе рассмотрено использование электрических дуг в промышленных агрегатах. Отмечен вклад отечественных и зарубежных авторов в развитии теории и практического применения электрических дуг. Показано описание электрических, магнитных, силовых и гидродинамических процессов, протекающих в дугах постоянного и переменного токов. Проведен анализ существующих математических моделей характеристик и поведения электрических дуг. Рассмотрены известные модели теплового излучения электрических дуг в условиях их горения в промышленных агрегатах. На основе проведенного анализа показана необходимость доработки существующих математических моделей и создание собственного алгоритмического обеспечения по определению параметров электрической дуги с учетом специфики ее горения в металлургических агрегатах с несколькими дугами.

Во второй главе показано, что изучение электромагнитного поля вблизи технологических агрегатов является важной задачей, так как оно влияет на основные технологические процессы, воздействует на приборы и человека. Проведен анализ существующих моделей для определения напряженности магнитного поля и электромагнитных сил вблизи дуги постоянного тока. Построена модель для нахождения напряженности магнитного поля вблизи дуги постоянного тока и для трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность. Для нахождения результирующего поля в произвольной точке пространства A от токов, проходящих через три параллельных электрода, использовался принцип суперпозиции магнитных полей (рисунок 1). Была выбрана полярная система координат (r, φ) с началом отсчета в центре распада электродов, а также декартова система координат (Oxy) направление оси Ox которой выбиралось совпадающим с направлением полярной оси ($\varphi = 0$). Центры первого, второго и третьего электрода имеют координаты $C_1(r_p, 0)$, $C_2(r_p, 2\pi/3)$ и $C_3(r_p, 4\pi/3)$ соответственно. Координаты вектора напряженности в точке A

$$\vec{H}_{Aj} = \vec{H}_{Aj} \left((-y_{CA} + y_{Cj}) \cdot b, (x_{CA} - x_{Cj}) \cdot b \right), \quad (1)$$

где $j=1, 2, 3$ - номер электрода, $b = \frac{I_0 \cdot \sin(2\pi\nu t + \varphi_j)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{((-y_{CA} + y_{Cj})^2 + (x_{CA} - x_{Cj})^2)} \cdot a_j}$.

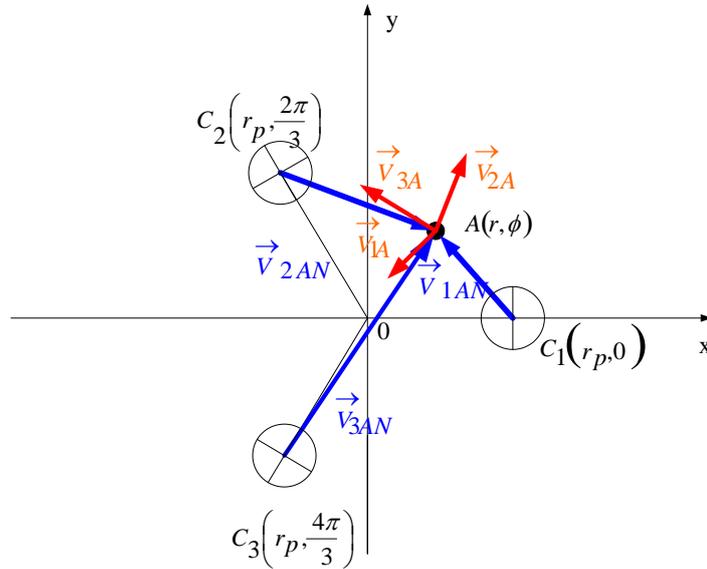


Рисунок 1 - Расположение векторов, сонаправленных векторам напряженности магнитного поля

Результирующая напряженность магнитного поля в точке A от действия трех параллельных токов можно определить как $\vec{H}_A = \vec{H}_A(x_{H1} + x_{H2} + x_{H3}, y_{H1} + y_{H2} + y_{H3})$, где x_{Hj}, y_{Hj} - координаты x и y вектора напряженности магнитного поля в точке A от j -го электрода. Были получены аналитические зависимости напряженности магнитного поля вблизи вертикальных бесконечных электродов с трехфазным током

$$H_x = h(-3r_*^4 (\sin(\psi) \sin(\psi + t) - 0,5 \cos(t)) + 3r_*^3 (\sin(\psi) \sin(2\psi - t) - 0,5 \cos(\psi - t)) - 1,5r_* \cos(\psi - t) + 1,5 \cos(t)) \quad (2)$$

$$H_y = h(3r_*^4 (\cos(\psi) \sin(\psi + t) - 0,5 \sin(t)) - 3r_*^3 (\sin(2\psi) \sin(\psi - t) - 0,5 \sin(\psi + t)) + 1,5r_* \sin(\psi - t) - 1,5 \sin(t)) \quad (3)$$

где $h = \frac{I_0}{2\pi r_p (r_*^6 + 2r_*^3 \cos\psi (4\sin^2\psi - 1) + 1)}$, $t = 2\pi\nu\tau$, $r_* = \frac{r}{r_p}$.

Для электродов конечной длины L результирующая напряженность магнитного поля находится по формуле $\vec{H}_{LA} = \vec{H}_{LA}(x_{LH1} + x_{LH2} + x_{LH3}, y_{LH1} + y_{LH2} + y_{LH3})$, где

$$x_{LHj} = \eta \cdot x_{Hj}, \quad y_{LHj} = \eta \cdot y_{Hj}, \quad \eta(r, z) = \frac{H_L}{H_\infty} = \frac{1}{2} \left(\frac{L-z}{\sqrt{r^2 + (L-z)^2}} + \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \text{ - отношение}$$

напряженности магнитных полей при конечном и бесконечном проводниках соответственно.

По полученной модели было создано программное обеспечение, при помощи которого для условий ДСП-180 ПАО "ММК" был визуализированы годографы вектора напряженности магнитного поля внутри и вне диаметра распада электродов. Установлено, что годограф имеет вид эллипса с направлением движения вектора напряженности магнитного поля по часовой стрелке при нахождении точки А внутри диаметра распада электродов (рисунок 2), и против хода часовой стрелки вне его (рисунок 3). При смещении точки по окружности относительно центра распада электродов меняется направление большой оси эллипса годографа. Построены нормированные векторные поля напряженности магнитного поля в различные моменты времени. Установлено, что вблизи трех электродов, через которые протекает трехфазный переменный ток, наблюдается бегущее магнитное поле.

На основании системного анализа проведено исследование поведения основных **электромагнитных сил**, действующих на электрическую дугу. В условиях трехфазной дуговой печи на дугу действуют силы: со стороны токов, протекающих по жидкому металлу, со стороны токов, проходящих со стороны параллельных дуг и токоподводов, со стороны собственного тока дуги. Получено среднеинтегральное значение силы, действующей на дугу со стороны токов, протекающих по жидкому металлу

$$F_m = \frac{\mu_0 I_{\partial n}^2}{8\sqrt{3}\pi} \ln \left[\frac{(\sqrt{l^2 + \Delta^2} + l)(\Delta + l_a)}{\Delta(\sqrt{(l_a + \Delta)^2 + l^2} + l)} \right] \quad (4)$$

и локальное среднее значение электромагнитной силы, действующей на единицу длины

$$f_m(z) = \frac{\mu_0 I_{\partial n}^2}{8\sqrt{3}\pi} \frac{1}{(\Delta + z)} \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\Delta + z)^2}}. \text{ Также найдены средняя результирующая сила,}$$

действующая на дугу со стороны токов, протекающих по параллельным дугам

$$F_d = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_{\partial n}^2}{4\pi l} \left(\sqrt{l^2 + l_o^2} - l - \sqrt{l^2 + l_{\partial o}^2} + \sqrt{l^2 + (l_o + l_{\partial o})^2} \right) \quad (5)$$

и локальная электромагнитная сила, действующая на единицу длины дуги

$$f_d(z) = \frac{\sqrt{3}\mu_0 I_{\partial n}^2}{4\pi l} \left(\frac{z}{\sqrt{l^2 + z^2}} + \frac{l_o + l_{\partial o} - z}{\sqrt{l^2 + (l_o + l_{\partial o} - z)^2}} \right). \text{ По полученной модели создано}$$

программное обеспечение, позволяющее рассчитывать и визуализировать в графическом виде основные среднеинтегральные силы, а также динамику их поведения в течение периода.

Из рисунка 4 видно, что векторы \vec{F}_m и \vec{F}_d расположены под прямым углом к друг другу,

поэтому модуль равнодействующей силы $F_{рез} = \sqrt{F_m^2 + F_d^2}$. Она направлена под углом φ к прямой, проходящей через центр распада электродов и ось электрода. Также на дугу действует сила, которая пытается вернуть ее в исходное положение - это сила взаимодействия дуги с собственным магнитным полем

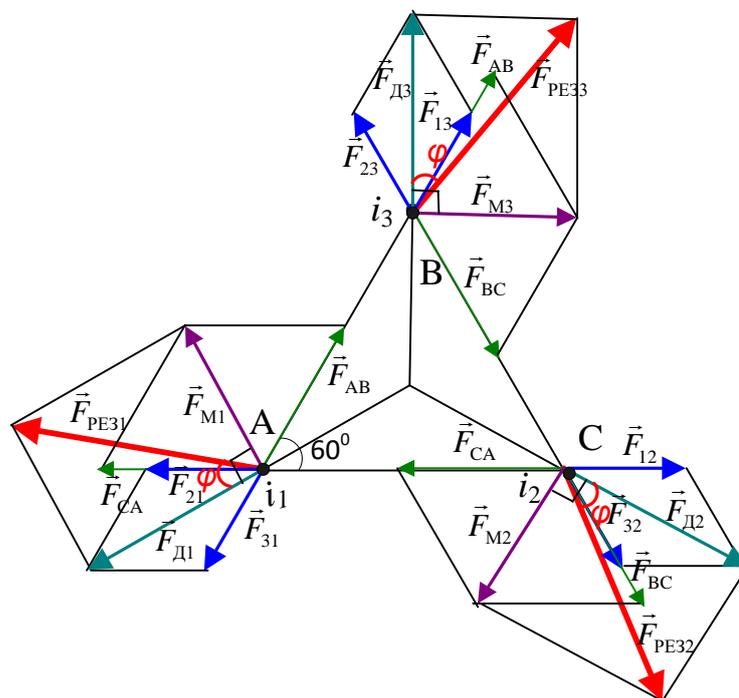
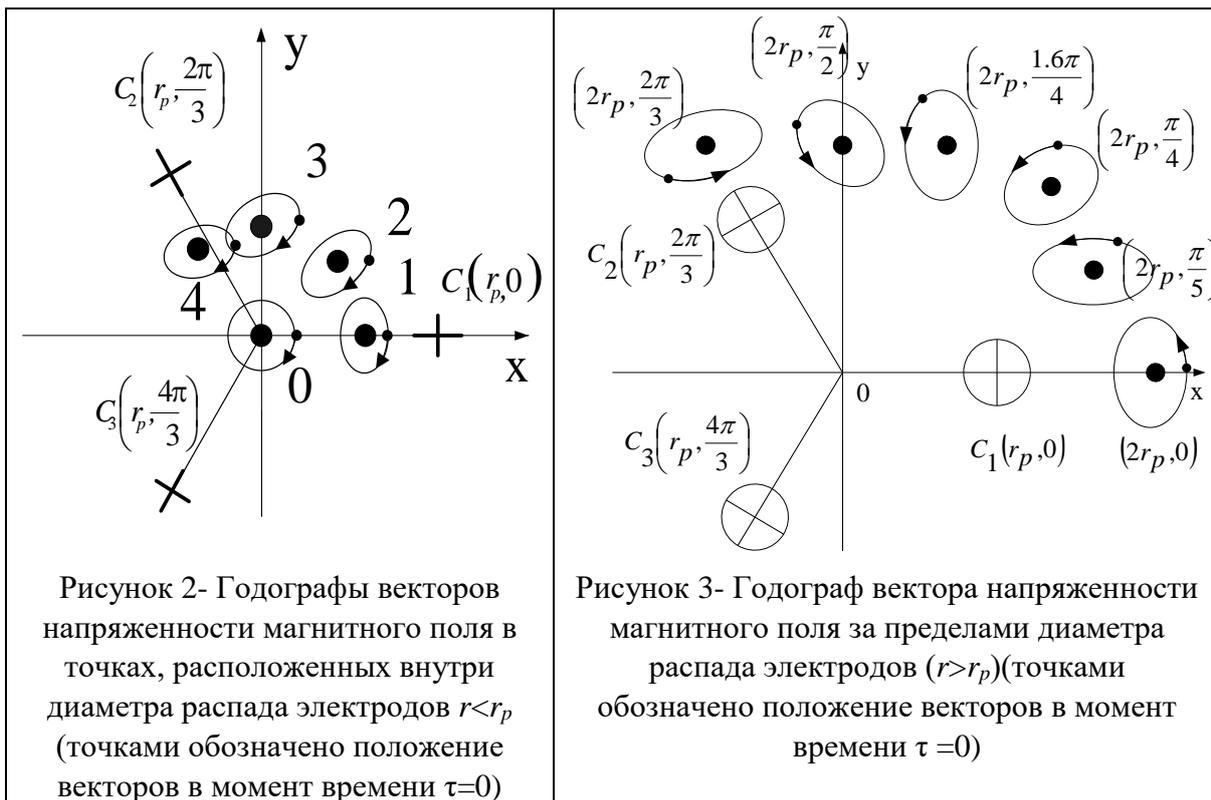


Рисунок 4- Направления среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на электрические дуги, горящие на горизонтальную поверхность:
 \vec{F}_{M_i} - силы со стороны токов, протекающих между дугами через жидкий металл;
 $\vec{F}_{д_i}$ - силы со стороны токов, протекающих через дуги и графитированные электроды;
 \vec{F}_{PE3_i} - результирующие силы

Все рассмотренные электромагнитные силы пропорциональны квадрату действующего значения тока, поэтому для анализа характера зависимостей сил от длины дуги выбран комплекс $F/I_{\text{дл}}^2$. На рисунке 5, а показаны графики зависимости $F_{\text{д}}/I_{\text{дл}}^2$ от безразмерного расстояния между дугами при разных безразмерных длинах электрода. Величина $F_{\text{д}}/I_{\text{дл}}^2$ находится в пределах от 0,1 до 0,2 Н/кА² при $l/l_0 \approx 1$, убывает с увеличением расстояния между дугами по закону близкому к обратной пропорциональности и существенно зависит от безразмерной длины электрода $l_{\text{эо}}/l_0$ в диапазоне от 0 до 5. На этом же рисунке приведена зависимость $F_{\text{м}}/I_{\text{дл}}^2$ от безразмерного расстояния между дугами, величина $F_{\text{м}}/I_{\text{дл}}^2$ находится в пределах от 0 до 0,08 Н/кА². Видно, что с увеличением расстояния между дугами от 0 до l_0 , сила $F_{\text{м}}$ резко возрастает от 0 до некоторого значения и далее увеличивается очень незначительно. На рисунке 5, б показаны зависимости соотношения сил $F_{\text{д}}/F_{\text{м}}$ от безразмерного расстояния между дугами. Видно, что при относительном расстоянии между дугами менее 1,5 – 2,5 более существенной оказывается сила $F_{\text{д}}$, чем $F_{\text{м}}$.

Направление результирующей средней силы $|\vec{F}_{\text{рез}}|$ определяется углом φ , который зависит от соотношения модулей сил $|\vec{F}_{\text{д}}|$ и $|\vec{F}_{\text{м}}|$. Дуги могут существенно отклоняться в сторону от прямой, соединяющей центр распада электродов и ось электрода. Например, для печи, имеющей среднюю длину дуги 0,2 м и расстояние между электродами 0,6 м, угол φ может иметь значение 45°- 60°.

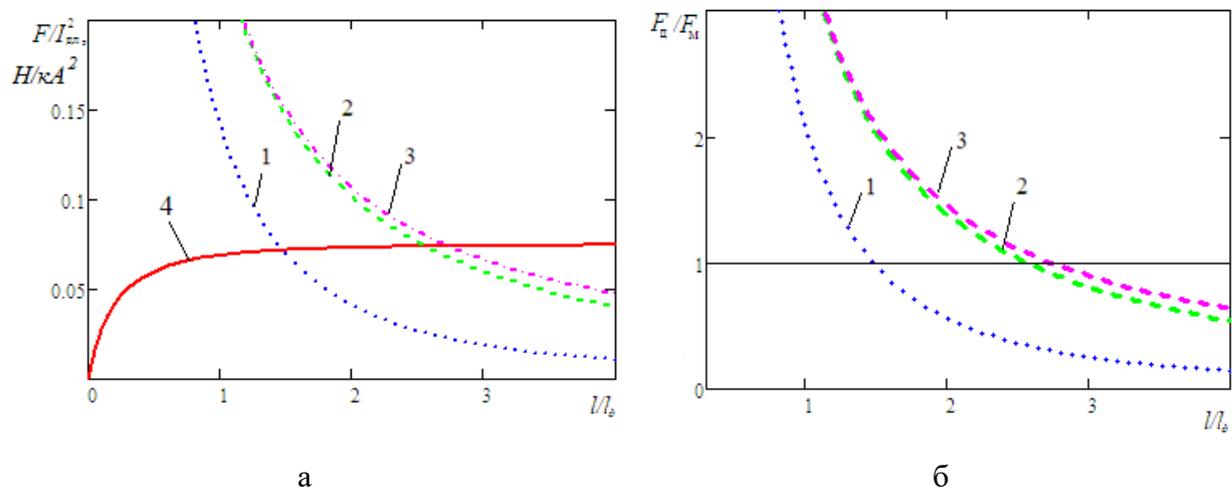


Рисунок 5 - Зависимости электромагнитных сил, деленных на квадрат тока $F_{\text{д}}/I_{\text{дл}}^2$ (линии 1-3); $F_{\text{м}}/I_{\text{дл}}^2$ (линия 4) (а) и соотношения сил $F_{\text{д}}/F_{\text{м}}$ (б) от безразмерного расстояния между дугами при безразмерной длине электрода: 1 - $l_{\text{эо}}/l_0=0$; 2 - $l_{\text{эо}}/l_0=5$; 3 - $l_{\text{эо}}/l_0=20$

В третьей главе рассмотрено математическое моделирование формы параллельно горящих на горизонтальную поверхность электрических дуг постоянного или переменного тока при их электромагнитном взаимодействии под действием силы $\vec{F}_{\text{д}}$. Для определения формы двух дуг постоянного тока при их электромагнитном взаимодействии использовался алгоритм, предложенный Н.И. Бортничуком и М.М. Крутянским. Форма оси первой дуги $y(z)$ (рисунок 6), через которую протекает ток i_1 при

электромагнитном взаимодействии с дугой, по которой протекает ток i_2 , описывается следующим интегро-дифференциальным уравнением

$$\frac{i_2}{i_1} \int_0^l \left(\frac{dy(\xi)}{d\xi} (\xi - z) - (-y(\xi) - y(z)) \right) \frac{d\xi}{\left((|y(\xi)| + y(z))^2 + (\xi - z)^2 \right)^{3/2}} - \int_0^l \left(\frac{dy(\zeta)}{d\zeta} (\xi - z) - (y(\zeta) - y(z)) \right) \frac{d\zeta}{\left((y(\zeta) + y(z))^2 + (\xi - z)^2 + y_0^2 \right)^{3/2}} - \frac{\mu_0 \beta(z)}{4\pi (1 + (dy/dz)^2)^{3/2}} \left| \frac{d^2 y}{dz^2} \right| = 0. \quad (6)$$

Для нахождения приближенного решения этого интегро-дифференциального уравнения предложены и реализованы три эвристических алгоритма. По первому предполагалось, что по дугам текут равные постоянные токи $i_1 = i_2$ (формы дуг зеркально симметричны относительно оси Oz), а неизвестная функция положения оси первой дуги имеет форму параболы $y(z) = a_1 z^2 + b_1 z + c$. Применяя начальные условия $y(0) = a$, $\left. \frac{dy}{dz} \right|_{z=0} = \alpha$, где α - тангенс угла наклона оси дуги в начальном ее сечении, получено $c = a$, $b_1 = \alpha$. Решая нелинейное уравнение (6) при разных z , находилась неизвестный коэффициент a_1 , который затем усреднялся.

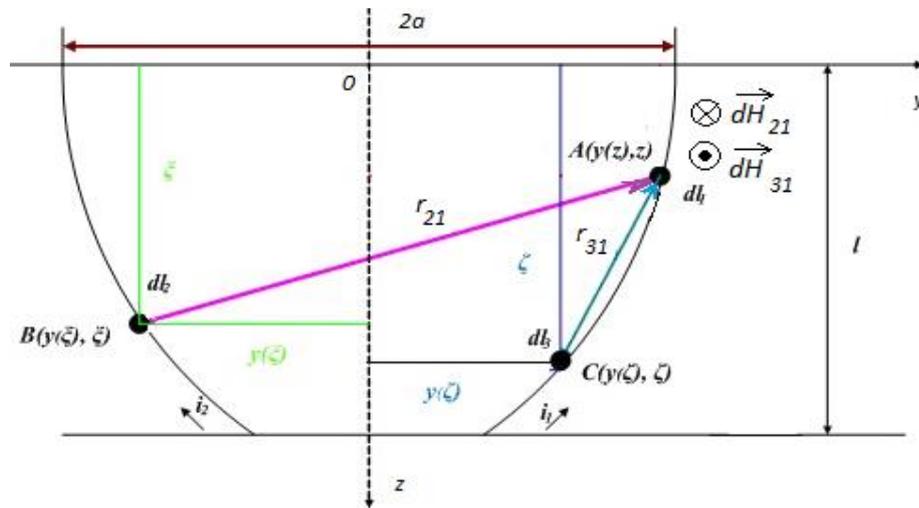


Рисунок 6-Основные размеры, используемые в математической модели взаимодействия дуг

По второму алгоритму также рассматривался случай одинаковых токов $i_1 = i_2$, был предложен эвристический численный метод, основанный на полиномиальной аппроксимации решения $y(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + \dots + a_n z^n$. Неизвестные коэффициенты a_2, a_3, \dots, a_n находились как минимум функции нескольких переменных $\phi_1(a_2, a_3, \dots) = \int_0^l \Phi^2 dz = \min$, где Φ — левая часть уравнения (6).

По третьему алгоритму рассматривалось нахождение формы осей двух дуг, при разных токах, проходящих через них $i_1 \neq i_2$. В этом случае для нахождения двух

неизвестных функций решалась система двух дифференциальных уравнений (6), записанных для каждой дуги, с граничными условиями:

$$y_1(0) = a, \quad \left. \frac{dy_1}{dz} \right|_{z=0} = \alpha_1, \quad y_2(0) = -a, \quad \left. \frac{dy_2}{dz} \right|_{z=0} = \alpha_2.$$

Для получения приближенного решения было предположено, что искомые функции формы осей столбов дуг имеют вид $y_j(z) = a_{0j}z + a_{1j}z^2 + a_{2j}z^3 + \dots a_{nj}^n$, где $j=1, 2$ — номер дуги. Из начальных условий, принимая $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, имеем $a_{11} = a_{12} = 0$, $a_{01} = a_{02} = 0$. Подлежащие нахождению искомые коэффициенты многочленов $a_{2j}, a_{3j} \dots a_{nj}$, находились как минимум функции нескольких переменных $\phi_3 = \int_0^l (\Phi_1^2 + \Phi_2^2) dz = \min$, где Φ_1, Φ_2 — левые части уравнения (6), записанные для первой и второй дуги соответственно. Искомые коэффициенты многочленов находились как минимум функции нескольких переменных (6).

Уравнение равновесия элемента столба дуги, на основе которого получено уравнение (6), было расширено и применено для нахождения формы осей двух или трех дуг постоянного или трехфазного переменного тока

$$k_1 d\vec{F}_{1-2} + d\vec{F}_{1-1} + d\vec{F}_{1-u} = 0, \quad (7)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий вид электромагнитного взаимодействия, $d\vec{F}_{1-2}$ — сила взаимодействия дуги с токами, протекающими по другим дугам, \vec{F}_{1-1} — сила взаимодействия дуги с собственным током, $d\vec{F}_{1-u}$ — центростремительная сила, выпрямляющая дугу.

Полученные значения коэффициента k_1 и характер электромагнитного взаимодействия в зависимости от рода тока и количества дуг приведены в табл.

Таблица - Коэффициент k_1 в уравнении (7) и характер электромагнитного взаимодействия дуг постоянного или переменного токов

Род тока	k_1	Характер электромагнитного взаимодействия дуг
<i>Взаимодействие двух дуг</i>		
Постоянные токи, текущие в одном направлении	1	притягиваются
Постоянные токи, текущие в разных направлениях	1	отталкиваются
Переменные токи со сдвигом фаз $\varphi = 0$	1	притягиваются
Переменные токи со сдвигом фаз $\varphi = 2\pi/3$	0,5	отталкиваются
<i>Взаимодействие трех дуг (электроды места привязки дуг образуют равносторонний треугольник)</i>		

Род тока	k_1	Характер электромагнитного взаимодействия дуг
Постоянные токи, текущие в одном направлении	$\sqrt{3}$	Притягиваются к центру распада электродов
Постоянные токи, ток первый первой дуги имеет противоположное направление второму и третьему току	$\sqrt{3}$	Первый ток отталкивается от центра распада электродов; второй и третий направлены по касательной к окружности с центром распада электродов
Переменный трехфазный ток	$\sqrt{3}/\pi$	Отталкиваются от центра распада электродов

С использованием предложенных алгоритмов было разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать и визуализировать форму дуг и в зависимости от их количества, рода тока, физических свойств плазмообразующего газа и окружающей среды. На рисунке 7 показаны примеры моделирования формы осей столбов при взаимодействии двух и трех аргоновых дуг постоянного или переменного токов.

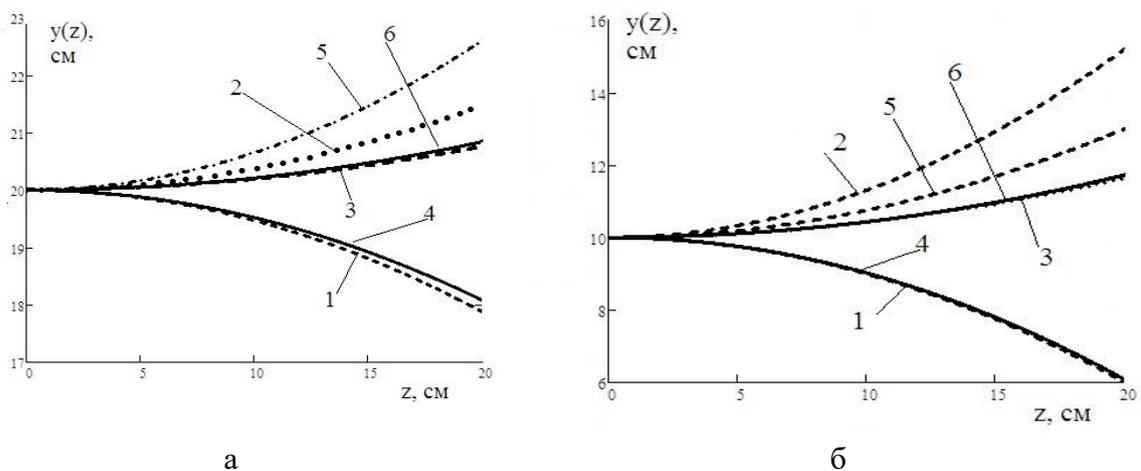


Рисунок 7-Форма оси столба дуги при взаимодействии двух дуг, по которым протекают: 1 — постоянные токи, текущие в одном направлении; 2 — постоянные токи, текущие в разных направлениях; 3 — переменные токи, сдвиг фаз между которыми $2\pi/3$. Форма оси столба дуги при взаимодействии трех дуг, по которым протекают: 4 — постоянные токи, текущие в одном направлении; 5 — постоянные токи, причем один из которых имеет противоположное направление; 6 — переменные токи, сдвиг фаз между которыми $2\pi/3$. Значения постоянных и действующих токов - 9 кА; расстояние между электродами: а — 40 см; б — 20 см

При этих расчетах для аппроксимации формы дуги использовались полиномы третьей степени. Из рисунка видно, что дуги, по которым протекают сонаправленные постоянные токи — притягиваются, а переменные — отталкиваются, причем, чем меньше расстояние между электродами, тем сильнее, причем их форма слабо зависит от количества электродов. Дуги, по которым протекают противоположно направленные

постоянные токи — отталкиваются, и чем меньше расстояние между электродами, тем более значительно, причем форма дуг определяется и количеством электродов. Были проведены сравнительные расчеты для условий горения дуг в промышленных агрегатах и экспериментальных установках. Полученные углы отклонения дуг от вертикали в сравнении с экспериментальными данными, полученными Ю.М. Мироновым и Г.А. Сисояном, не превышали 10%.

В четвертой главе рассмотрено моделирование теплового излучения на горизонтальную поверхность от двух или трех дуг постоянного или трехфазного переменного тока.

Рассмотрена модель теплового потока, падающего на произвольно расположенную площадку dS , находящуюся на горизонтальной поверхности от электрической дуги, расположенной под углом θ к ней. Была выбрана полярная система координат с началом отсчета в точке пересечения электрической дуги OA и поверхности ванны (r, ψ) (рисунок 8), а также декартова система координат (Oxy) направление Ox которой совпадает с направлением полярной оси ($\psi = 0$). Ось электрической дуги находится в плоскости Oxz . Положение площадки dS задается ее расстоянием rot точки O и углом ψ . Вектор \vec{k} перпендикулярен площадке dS , а вектор \vec{n} лежит в плоскости AOC и перпендикулярен прямой OA .

С использованием модели излучающего точечного цилиндра, предложенной А.Н. Макаровым, было получено, что тепловой поток в точке C от излучения дуги определяется как

$$q_{изл} = \frac{K_3 \cdot P \cdot r \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \psi \cdot \sin^2 \theta}}{\pi^2 \cdot l_0} \int_0^{l_0} \frac{z_0}{(r^2 + 2 \cdot r \cdot z_0 \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + z_0^2)^2} dz_0,$$

$$q_{изл}(r, A) = \frac{K_3 \cdot P \cdot \sqrt{1 - A^2}}{2\pi^2 \cdot l_0 \cdot r} \left[\frac{-B + A \cdot \operatorname{arcth}\left(\frac{A}{B}\right)}{B^3} + \right.$$

$$\left. + \frac{B \cdot r(l_0 A + r) - A(r^2 + 2A \cdot r \cdot l_0 + l_0^2) \operatorname{arcth}\left(\frac{l_0 + rA}{rB}\right)}{B^3(r^2 + 2A \cdot r \cdot l_0 + l_0^2)} \right], \quad (8)$$

где $A = \cos \psi \cdot \sin \theta$; $B = \sqrt{A^2 - 1}$, K_3 — поправочный экспериментальный коэффициент, учитывающий долю мощности дуги, идущую на излучение, P — полная мощность излучения дуги (известна из заданных электрических параметров дуги).

Создана математическая модель для определения теплового потока, падающего от трех наклонных одновременно горящих электрических дуг длиной l_0 , на произвольно расположенную площадку, находящуюся на горизонтальной поверхности. С ее использованием было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее рассчитывать и визуализировать тепловой поток в зависимости от количества дуг и их параметров. На рисунке 9 показаны зависимости теплового излучения дуги от угловой координаты ψ , определяющей расположение площадки dS при разных углах наклона θ дуги. Видно наличие плоскости зеркальной

симметрии Oxz , минимальное значение теплового потока $q_{изл}$ наблюдается при $\psi=0^0$, а максимальное – вблизи $\psi =180^0$. При $\psi =90^0$ и 270^0 тепловой поток не зависит от угла наклона дуги, это является следствием того, что при этих θ величина $A = \cos\psi \cdot \sin\theta = 0$. С увеличением расстояния от точки привязки дуги на расплав тепловой поток резко убывает и практически не зависит от ψ при $r/l_0 > 5$.

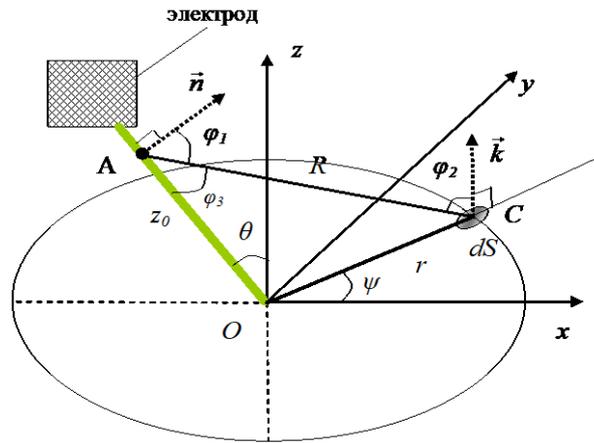


Рисунок 8 - К расчету плотности теплового излучения дуги на горизонтальную площадку dS

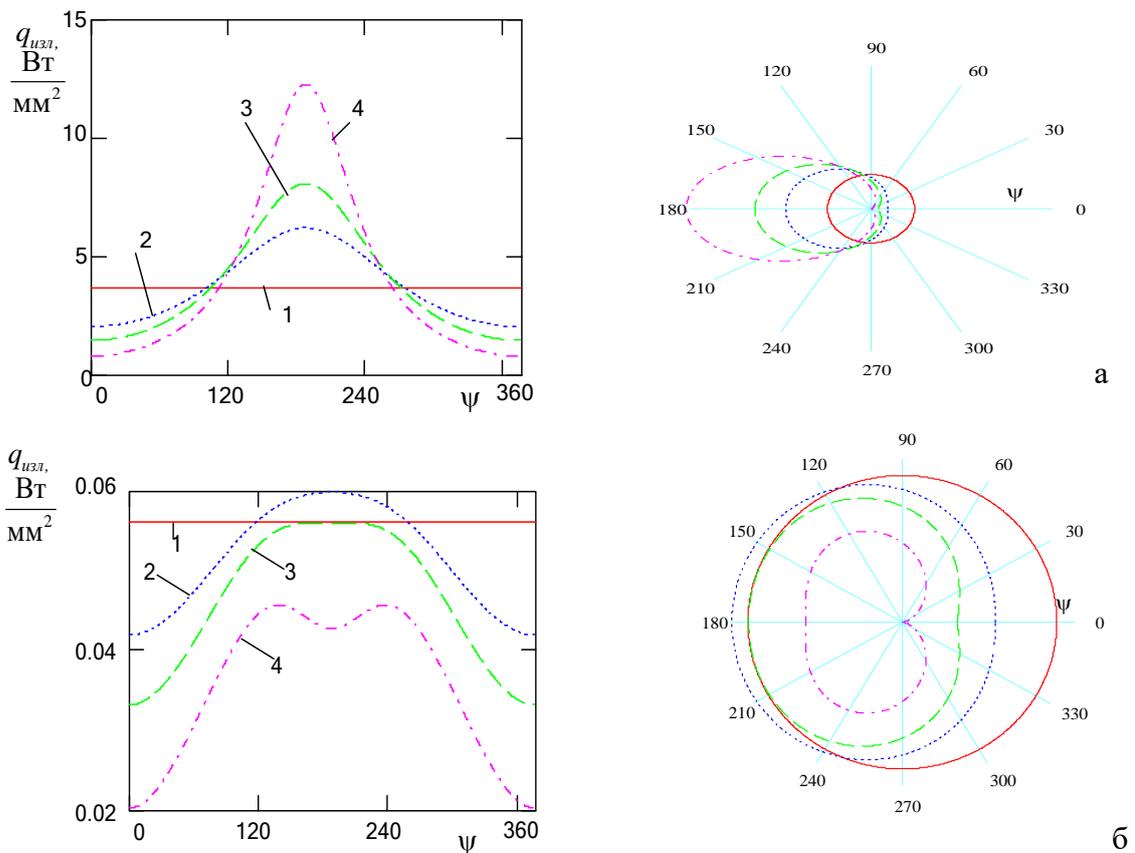


Рисунок 9-Тепловой поток вдоль азимутальной координаты на разных расстояниях от точки привязки дуги: а – $r/l_0=1$; б – $r/l_0=5$. Угол наклона дуги:

1 - $\theta=0^0$; 2 - $\theta=20^0$; 3 - $\theta=30^0$; 4 - $\theta=45^0$

На рисунке 10 показано распределение теплового потока по азимутальной координате при разном расстоянии от центра распада электродов. Наибольший тепловой поток наблюдается под дугами на расстоянии, расположенном между половиной диаметра распада электродов и точками привязки дуг на горизонтальную поверхность. Внутри диаметра распада электродов он ниже и сильно снижается при удалении от точек привязки дуг на горизонтальную поверхность от центра распада электродов. При движении по азимутальной координате минимальный тепловой поток наблюдается между электродами в направлениях $\alpha=60^{\circ}$, 180° и 300° . Наибольший тепловой поток при движении по азимутальной координате внутри диаметра распада электродов ($r < D_p/2$) отмечается в направлениях их осей, а вне распада электродов ($r > D_p/2$) в направлениях, смещенных от осей электродов на $\pm 15^{\circ}$ (см. рис. 10).

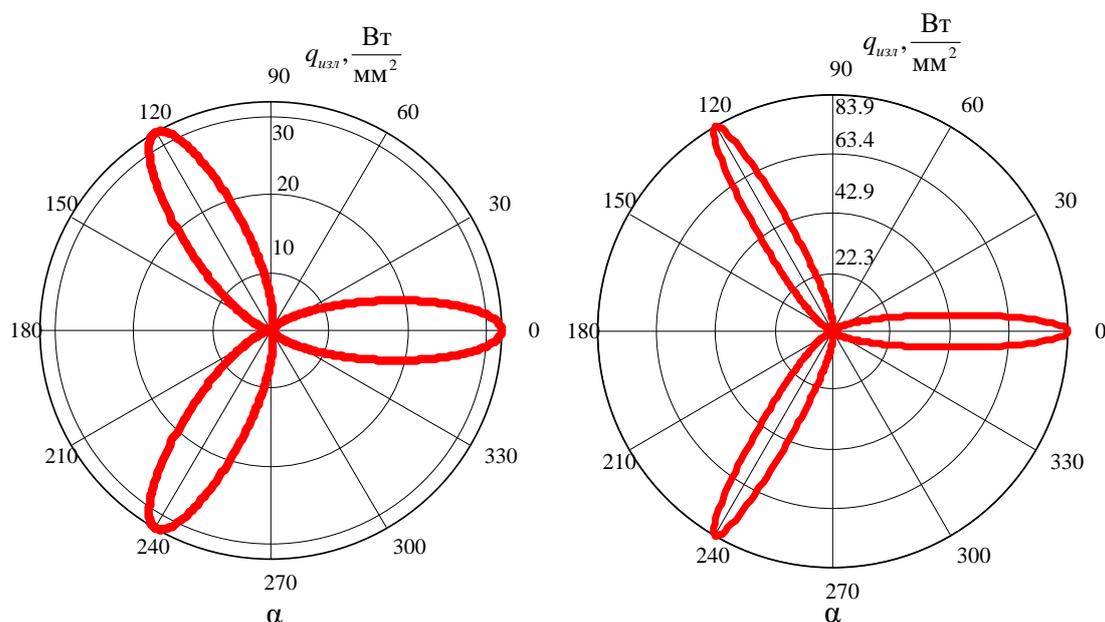


Рисунок 10- Распределение теплового потока по азимутальной координате на расстоянии от центра распада электродов: а- $r=0,4$ м; б- $r=1,4$ м

Адекватность предлагаемой модели излучения дуг при их электромагнитном взаимодействии проводилась при помощи данных, полученных на промышленной дуговой шахтной печи ШП-2 ПАО «Северсталь» номинальной вместимостью печи по металлошихте 150 т, диаметром распада электродов 1100 мм и диаметром электродов 610 мм.

Косвенное влияние интенсивности излучения электрических дуг на тепловосприятие стенки печи определялась по температуре воды, выходящей из боковых водоохлаждаемых панелей, расположенных. Для анализа были рассмотрены результаты измерений температуры охлаждающей воды, проходящей через 21 панель за 4 суток. Результаты суточных измерений были записаны через каждые 30 секунд в 24 файлах. Для их просмотра и обработки использовалась программа *IBA Analyzer*. Из полученного многомерного массива данных с объемом выборки около 11520 измерений были убраны грубые ошибки, далее были получены усредненные температуры для каждой панели. На рисунке 11 показан полученный график зависимости значения средней температуры от

номера панели в том порядке, в котором они расположены вдоль азимутальной координаты в печи.

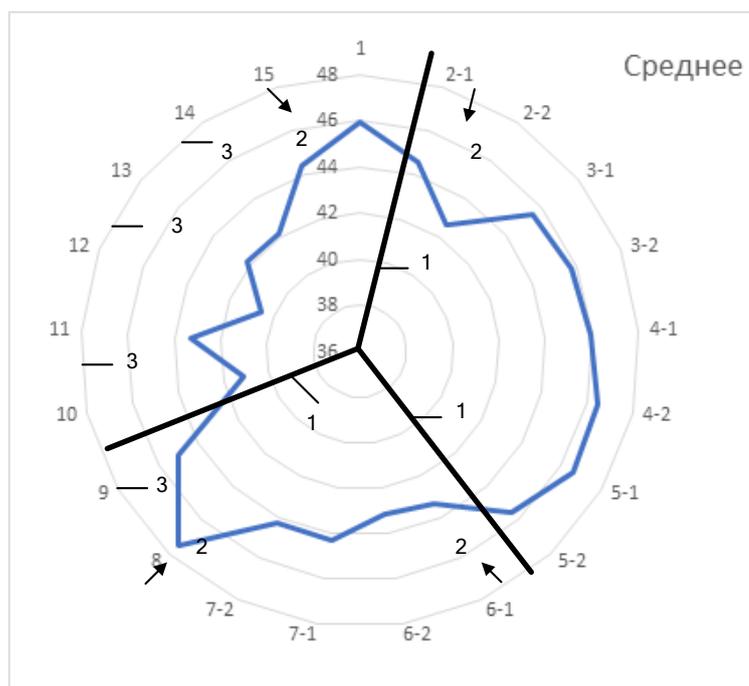


Рисунок 11- Распределение средней температуры охлаждающей воды в зависимости от номера панели: 1- прямые, соединяющие оси электродов с центром диаметра распада электродов, 2– газовые горелки RCB, 3– кислородные инжекторы

Из рисунка видно, что максимальные температуры наблюдаются не напротив линии соединяющие центр распада электродов и их оси, а немного отклонены от нее по азимутальной координате. Это отклонение подтверждает тот факт, что равнодействующая электромагнитная сила к данной линии направлена под углом φ , как это показано на рисунке 4. Полученное распределение температур от номера панели вдоль азимутальной координаты не является симметричным, так как в шахтной печи на тепловосприятие боковых стен оказывают влияние газовые горелки и кислородные инжекторы.

Методика обработки информации состоит в следующем: по заданным свойствам электродуговой печи, количеству дуг, свойствам плазмообразующего газа, напряжению дуг, диаметру распада электродов, расстоянию между электродами, на основе модели Н.И. Бортничука и М.М. Крутянского для получения формы оси столба дуги, а также модели Макаров, были дополнены и получены модели для нахождения формы осей столбов дуг для трехфазного переменного тока, разработано программное обеспечение, на основании которого получен средний тепловой поток.

Научные положения и разработки диссертации, в том числе созданные автором модели, алгоритмы и программное обеспечение внедрены в практику работы ООО РМЗ «НИХАРД-СЕРВИС» (г. Златоуст).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ используемых на практике, моделей и методов, описывающих электромагнитные и тепловые характеристики электрических дуг постоянного и переменного тока в промышленный агрегат, работающих в различных режимах. В том числе: модели формы электрической дуги и поведения дуг при их электромагнитном взаимодействии, модели теплового излучения дуг в условиях горения в промышленных агрегатах и др.

2. Предложена математическая модель и алгоритмы расчета по определению напряженности магнитного поля вблизи нескольких параллельно горящих дуг постоянного или трехфазного переменного тока. Получена аналитическая зависимость напряженности магнитного поля в условия горения дуг трехфазного переменного тока. По результатам моделирования установлено, что значение модуля напряженности магнитного поля вблизи вертикальной дуги постоянного тока обратно пропорционально расстоянию от ее оси, а для трех дуг трехфазного переменного тока действующее значение модуля напряженности магнитного поля обратно пропорционально квадрату расстояния от центра распада электродов. Показано, что вблизи трех дуг трехфазного переменного тока наблюдается бегущее магнитное поле.

3. Систематизированы существующие и разработаны оригинальные математические модели и алгоритмы расчета основных электромагнитных сил, действующих на электрическую дугу при горении нескольких параллельных дуг постоянного или трехфазного переменного тока. Установлено, что результирующая среднеинтегральная электромагнитная сила, действующая на дугу, находится в горизонтальной плоскости и отклоняется в сторону от прямой, соединяющей центр распада электродов и ось электрода. В реальных электродуговых установках этот угол может составлять 45-65°. Выявлено, что при расстоянии между дугами менее 2,5 длины участка параллельно текущих токов, существенное влияние на среднее отклонение дуги от вертикали и форму дуг в трехфазной дуговой печи оказывает сила взаимодействия между токами, протекающими через параллельные дуги, а при больших расстояниях - сила взаимодействия дуги с токами, протекающими через жидкий металл.

4. Разработаны эвристические алгоритмы расчета формы параллельно горящих электрических дуг постоянного или трехфазного переменного тока при их электромагнитном взаимодействии. Для уравнения равновесия оси столба дуги, появляющегося при решении интегро-дифференциального уравнения, впервые были предложены алгоритмы, основанные на полиномиальной аппроксимации решения, позволяющий получить результаты с достаточной для инженерных расчетов точностью. При моделировании взаимодействия дуг с одинаковыми токами установлено, что форма осей дуг практически не зависит от силы тока, но на нее существенно влияет количество параллельно горящих дуг, расстояние между ними и род тока. Установлено, что при взаимодействии двух дуг с разными токами, плазменный столб с большим током ведет себя как относительно более инерционный объект. Его максимальное отклонение по горизонтали относительно небольшое по сравнению с отклонением дуги, через которую протекает меньший ток.

5. Разработаны алгоритмы расчета теплового потока, падающего на горизонтальную поверхность жидкой ванны от наклонной электрической дуги. На основе проведенного анализа металлургических агрегатов, содержащих несколько дуг,

предлагается методика определения потока излучения от нескольких одновременно горящих электрических дуг заданной формы на горизонтальную поверхность. В результате проведенного экспериментального исследования моделей и алгоритмов обработки информации в системе установлено, что при отклонении электрической дуги от нормали к поверхности ванны падающий тепловой поток перестает быть осесимметричным; в распределении тепловых потоков по горизонтальной поверхности имеет место зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось дуги, перпендикулярной поверхности ванны. Минимальное значение теплового потока наблюдается на площадке, расположенной на поверхности ванны под углом 0° к полярной оси, а максимальное – под углом 180° . В направлениях 90° и 270° тепловой поток не зависит от угла между нормалью к поверхности ванны и направлением излучения; с увеличением расстояния от точки привязки дуги на расплав тепловой поток резко убывает и при расстоянии более 5 длин дуги практически не зависит от азимутального направления. При горении трех электрических дуг минимальный тепловой поток наблюдается в направлениях между электродами, а наибольший - вблизи их осей.

6. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять магнитные поля вблизи электрических дуг, горящих на горизонтальную поверхность, находить величину и направление среднеинтегральных сил, форму дуг и тепловой поток, падающий на горизонтальную поверхность в зависимости от количества дуг, расстояния между ними, их расположения и рода тока. Разработано специальное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение позволяющее принимать решения об эффективной теплоотдаче излучения дуг к шихте в зависимости от наклона дуг, определяемое геометрией печи и токоподводов, а также протекающих токов.

7. Методика обработки информации для определения среднего теплового потока излучения от нескольких параллельно горящих на горизонтальную поверхность дуг постоянного или переменного токов с учетом их формы. Предложенные в рамках диссертационного исследования алгоритмы и программное обеспечение внедрены в систему автоматизированного регулирования и прогнозирования тепловой работы металлургических многоэлектродных агрегатов, для повышения достоверности оценки тепловосприятости шихты и износа керамической футеровки печи.

8. Результаты моделирования и созданное программное обеспечение можно использовать при проектировании новых и реконструкции имеющихся многоэлектродных дуговых промышленных агрегатов, а также для определения воздействия электромагнитных полей и теплового излучения электрических дуг на приборы и человека. Специальное программное обеспечение может быть встроено в систему автоматизированного регулирования и прогнозирования тепловой работы металлургических агрегатов, для повышения достоверности оценки тепловосприятости шихты, износа футеровки печи при разных технологических режимах горения дуг.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах,
рекомендованных ВАК РФ

1. O.V. Loginovsky., **Е.М. Kostyleva.** , I.M. Yachikov Optimization of the lining wear coefficient on the basis of control of three phase-current electric arcs characteristics // Bulletin of the South Ural state University. Series: Computer technologies, automatic control, radio electronics. -2020. Vol/20. – no/ 3 - p 129-134
2. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Характеристики электрических дуг трехфазного тока, горящих на горизонтальную поверхность при их электромагнитном взаимодействии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. -2020. Т20. - №2 - С 125-137
3. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.**, Портнова И.В. Динамика электромагнитных сил, отклоняющих дуги от вертикали в трехфазной дуговой печи// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2020. – Т 63.-№1. - С. 27-33
4. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Комплекс программ для определения параметров электрических дуг трехфазного переменного тока, горящих на горизонтальную поверхность. Программные продукты и системы, 2017, №3, С 537-545
5. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Поведение основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2015. - №7. - С. 479-485.
6. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. - №5. – С. 56-61
7. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Математическое моделирование формы дуг при их электромагнитном взаимодействии. Сообщение 1. Форма двух дуг постоянного тока, горящих между катодами и токоподводящей поверхностью // Известия высших учебных заведений, Черная металлургия. 2014. - №1. - С. 59-64.
8. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.**, Модель распределения теплового потока от излучения электрической дуги, расположенной под углом к плоской тепловоспринимающей поверхности // Известия вузов. Черная металлургия. -2011.- №7.- С. 25-29.
9. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.** Анализ поведения магнитного поля вблизи электродов дуговых печей посредством математического моделирования // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия .- 2011, №1. - С. 18-20.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в Scopus

10. Electromagnetic Force Dynamics Deflecting Arcs from Verticals in a Three-Phase Electric Arc Furnace Yachikov, I.M., **Kostyleva, E.M.**, Portnova, I.V. 2020 Steel in Translation 50(1), с. 6-10
11. Yachikov I.M., **Kostyleva E.M.** Electromagnetic forces on the arc in a three-phase arc furnace. Steel in Translation. 2015. Т. 45. № 7. p. 467-472. DOI: 10.3103/S0967091215070141.
12. Yachikov I.M., **Zaretskaya E.M.** Radiant heat flux from an electric arc inclined to the plane of the receiving surface. Steel in Translation. 2011. Т. 41. № 7.p. 550-554. DOI: 10.3103/S0967091211070151.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

13. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.**, Храмшин В.Р. Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи // Свидетельство о государственной регистрации программы №2016618499 от 01 августа 2016.
14. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Взаимодействие дуг // Свидетельство о государственной регистрации программы №2013619388 от 03 октября 2013.

Публикации по теме диссертации в других изданиях

15. **Костылева Е.М.** Математическое моделирование напряженности электромагнитного поля, создаваемого дуговыми сталеплавильными печами трехфазного переменного тока // Автоматизированные технологии и производства. 2016. № 3 (13). С. 56-59
16. **Костылева Е.М.** Математическое моделирование поведения теплового потока, падающего на расплав в трехфазной дуговой печи // Символ науки международный научный журнал. 2016. № 11-3 (23). С. 98-101
17. **Костылева Е.М.** Математическое моделирование поведения электромагнитных сил, действующих на электрическую дугу // Евразийский союз ученых (ЕСУ). Ежемесячный научный журнал, 2016, №31 – Ч 1. – С. 56 – 58.
18. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Математическое моделирование локальных и среднеинтегральных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи // Информационные технологии и системы Труды Четвертой Международной научной конференции, 2015. - С. 64-69
19. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Математическая модель и алгоритмы расчета положения трех электрических дуг, горящих между параллельными электродами и токоподводящей поверхностью // Информационные технологии и системы: материалы Третьей междунар. конф. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2014. – С. 52–55
20. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Алгоритмы расчета положения трех дуг, горящих между параллельными электродами и токоподводящей поверхностью // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 72 международной научно-технической конференции / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – С. 172–176
21. Вдовин К.Н., Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Анализ основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи // Теория и технология металлургического производства. - 2014. - № 2 (15). -С. 70-76.
22. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.**, Хромых Ю.Ю. Разработка алгоритма нахождения положения электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии в многоэлектродных дуговых печах // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2013) с международным участием (Екатеринбург, 28-29 марта 2013 г.).— Екатеринбург: УрФУ, 2013. - С 281-284.
23. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Алгоритм расчета формы двух дуг при их электромагнитном взаимодействии // Информационные технологии и системы: материалы Второй междунар. конф. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2013. – С. 74–77.

24. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Положение электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии в многоэлектродных дуговых печах // Информационные технологии и системы: материалы Первой междунар. конф. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2012. - С. 36-38
25. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Моделирование формы дуг постоянного тока при их электромагнитном взаимодействии // межрегион. сб. науч. тр. /под ред. В.М. Колокольцева. Вып.11. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та. С. 195-201
26. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.** Приближенный алгоритм нахождения положения электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии в многоэлектродных дуговых печах // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: сборник докладов международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 423–426
27. Ячиков И.М., **Костылева Е.М.**, Леонов С.Ю. Моделирование формы двух параллельно горящих дуг при их электромагнитном взаимодействии // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах.-2012.-№2.- С. 83-87.
28. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.** Характер магнитного поля вблизи графитированных электродов ДСП. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 69-ой научно-технической конференции. –Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011.-Т.2. С 13-15
29. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.** Моделирование магнитного поля вблизи графитированных электродов ДСП. Приложение математики в экономических и технических исследованиях. Вып. 3:сб. научных трудов/ под ред. М.В. Бушмановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун- та им. Г.И. Носова, 2011. С. 41-46
30. Ячиков И.М. **Зарецкая Е.М.** Модель распределения теплового потока от излучения электрической дуги, расположенной под углом к плоской тепловоспринимающей поверхности // Инновационные материалы и технологии в машиностроительном производстве: материалы Всероссийской научно-практической конференции (11-12 марта 2011г.); отв. ред. А.А. Веселовский. –Орск: Издательство ОГТИ, 2011. - С. 206-209.
31. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.** Модель теплового потока, падающего на поверхность металла от дуг в ДСП // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах :междунар. сб. науч. трудов. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск.гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. - Ч. I. С. 161-167.
32. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.** Тепловой поток излучения электрической дуги при отклонении ее оси от нормали к поверхности расплава. Научные труды международной заочной конференции, посвященной 15-летию со дня создания Регионального отделения Академии Инженерных Наук им. А.М. Прохорова, «Инженерная поддержка инновации и модернизации» 1-10 декабря 2010 г. Выпуск 1. Екатеринбург: ИВТОБ, 2010, С 94-97
33. Ячиков И.М., **Зарецкая Е.М.** Характер магнитного поля вблизи графитированных электродов ДСП //Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIV Международной конференции/под редакцией В.Е. Рощина – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. - Ч. 2. – С. 148-154

Костылева Елизавета Марковна
МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «__»____2020г.г. Формат 60×84 1/16. Печ. л. __.

Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж __ экз. Заказ № __.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЗАО «Магнитогорский дом печати» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Карла Маркса, 69