

Исх. №: 353-КТ от 04.12.2020г

ОТЗЫВ

доктора технических наук Нехамина Сергея Марковича на диссертационную работу **Костылевой Елизаветы Марковны**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)» на тему: «Модели и алгоритмы для определения характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых печах»

Актуальность темы диссертации

Электродуговые печи являются одним из наиболее крупных и массовых потребителей электроэнергии. В связи с этим вопрос энергоэффективности использования дугового разряда, являющийся задачей исследования Костылевой Е.М., крайне актуален, поскольку в дуге выделяется преобладающая доля мощности дуговых печей. От решения названной задачи зависит экономическая эффективность производств электростали, синтетического чугуна и ферросплавов - системообразующих производственных мощностей металлургии. От энергоэффективности дуговых печей зависит также решение чрезвычайно актуальной экологической задачи – снижения выбросов в атмосферу углекислого газа и других вредных веществ, экономия углеродистого и минерального сырья, запасы которого истощаются.

Актуальность теме диссертации Е.М.Костылевой придает также проведенный ей системный анализ многообразия факторов и условий, влияющих на режимы и параметры работы дуги в дуговых печах, обобщения и выводы из выполненной работы, позволяющие специалистам решать задачи повышения энергетической, экономической и экологической эффективности дуговых печей.

Общая характеристика диссертационной работы

Поставленные в работе задачи и полученные результаты соответствуют выбранной научной специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)» по следующим пунктам:

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

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

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

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



Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Объем – 173 страницы машинописного текста, в том числе 77 рисунков, 6 таблиц и 4 приложений. Список литературы включает 152 наименования.

В первой главе на основе литературного обзора рассмотрены электрические, магнитные, гидродинамические и силовые процессы, протекающие в дугах переменного и постоянного тока. Проанализированы математические подходы для описания перечисленных процессов. Рассмотрены существующие подходы к определению формы электрических дуг, их поведения при электромагнитном взаимодействии и теплового излучения дуг в условиях их работы в многоэлектродных дуговых агрегатах.

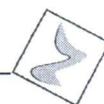
Во второй главе приведены математические модели для определения напряженности магнитного поля вблизи графитированных электродов конечной и бесконечной длины применительно к дуговой печи постоянного и трехфазного переменного тока. Наиболее интересным является полученная автором аналитическая модель для определения напряженности магнитного поля вблизи графитированных электродов бесконечной длины постоянного и трехфазного переменного тока.

На основе обобщения существующих теоретических моделей и экспериментальных результатов сформулированы расчетные зависимости и алгоритмы для определения основных электромагнитных сил (локальных и среднеинтегральных), действующих на дуги в многоэлектродных печах при их взаимодействии друг с другом, а также с постоянными и трехфазными переменными токами, протекающими в электрическом контуре печи.

На основании полученных автором зависимостей и алгоритмов разработано специализированное программное обеспечение. Выполнено компьютерное моделирование, показывающее вклад отдельных составляющих электромагнитных сил в поведение дуги.

В третьей главе на основании полученных во второй главе результатов выполнено исследование формы электрических дуг постоянного и переменного тока при их электромагнитном взаимодействии.

При конструировании различных дуговых и плазменных печей необходимо учитывать форму дуг, зависящую как от условий их горения и теплообмена, так и от электромагнитных сил, которые определяются величиной протекающих токов, длиной дуг, расстоянием между ними и токоподводами. Рассмотрено интегро-дифференциальное уравнение равновесия для двух столбов дуг при их электромагнитном взаимодействии, полученное Бортничуком Н.И. и Крутянским М.М., а также полученное ими частное решение. Сделан вывод о необходимости и целесообразности поиска решения данной задачи для широкого спектра условий, представляющих интерес с точки зрения теории и практики рассматриваемых процессов. В диссертационной работе предложены три эвристических алгоритма, позволяющие получить приемлемые (с практической точки зрения) решения уравнения равновесия оси столба дуги. Был разработан эмпирический численный метод, основанный на полиномиальной аппроксимации решения и поиске неизвестных коэффициентов полинома путем определения минимума функции по методу Левенберга-Марквардта.



Этот алгоритм использован автором также для нахождения приближенной формы электрических дуг постоянного или трехфазного переменного тока, горящих между вертикальными электродами и горизонтальной токопроводящей поверхностью. На основании полученных количественных зависимостей разработано программное обеспечение. На разработанные автором программы для ЭВМ получены свидетельства государственной регистрации.

С использованием разработанного программного обеспечения проведено моделирование положения осей аргоновых дуг для случая взаимодействия двух дуг и для трех, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, дуг, горящих между электродами и токоподводящей поверхностью. Проведено сопоставление результатов компьютерного моделирования с известными теоретическими и эмпирическими данными.

В четвертой главе выполнено математическое моделирование теплового излучения электрических дуг, расположенных под углом к горизонтальной поверхности.

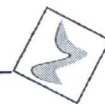
На основе модели дуги как излучающего цилиндра, предложенной А.Н. Макаровым, Костылевой Е.М. получены алгоритмы расчета теплового излучения от электрических дуг, расположенных под углом к горизонтальной поверхности расплава в дуговой печи. В частности, разработана модель теплового излучения от наклонной дуги на линию ее горизонтальной проекции и модель теплового потока от наклонной дуги на произвольную горизонтальную площадку.

Описан созданный программный модуль для расчета теплового излучения от параллельно горящих наклонных электрических дуг. Приведены результаты и анализ компьютерного моделирования теплового потока излучения от дуги и от трех наклонных электрических дуг на горизонтальную площадку.

Полученные расчетные результаты идентифицированы с экспериментальными данными по крупной промышленной дуговой сталеплавильной печи вместимостью 180 тонн. Влияние интенсивности теплового излучения электрических дуг косвенно оценивалось по перепаду температур охлаждающей воды, выходящей из боковых водоохлаждаемых панелей промышленной дуговой печи. Было установлено, что наибольшие значения тепловых потоков наблюдались не на оси, соединяющей центр распада электродов и ось электродов, а на некотором отклонении от нее. Это косвенно подтверждает предложенную автором модель поведения дуг трехфазного тока при их электромагнитном взаимодействии.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Для основных данных по промышленным металлургическим агрегатам с использованием компьютерного моделирования проведено исследование основных характеристик электромагнитного взаимодействия электрических дуг и их теплового излучения при горении на горизонтальную поверхность.
2. Впервые предложен эмпирический 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 расплава.
3. Получено распределение теплового потока по горизонтальной поверхности при привязке на нее трех электрических дуг трехфазного переменного тока.



Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Полученные результаты основаны и согласованы с известными теоретическими данными и не противоречат экспериментальным данным автора и известным эмпирическим данным других авторов.

Значимость результатов, полученных автором диссертации, для практики

Разработанные алгоритмы и программные продукты могут быть использованы при разработке новых и модернизации действующих дуговых печей для повышения энергетической, экологической и экономической эффективности проводимых в них технологических процессов.

Публикации и апробация работы

Результаты работы достаточно полно опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК, проиндексированы в международной базе SCOPUS, получены две государственные регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы докладывались на профильных конференциях и в достаточной степени апробированы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

*По содержанию работы имеются следующие **вопросы и замечания**:*

1. В разработанных моделях не учтен мениск, который образуется на горизонтальной поверхности расплава под пятном привязки дуги, хотя в обзоре автор указывает на его существование. В чем причина?

Промышленная дуга переменного тока с частотой 100 Гц изменяет свое положение и форму, непонятно как это учитывается при расчете формы оси дуги и ее тепловых потоков излучения.

2. При расчете напряженности магнитного поля и моделировании формы оси столба дуги в математической модели не учитывается экранирование стальным кожухом печи магнитного поля, создаваемого внутри печи внешним токоподводом. Насколько это допущение влияет на полученные результаты и выводы.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Е.М. Костылевой.

Заключение

Диссертация Костылевой Елизаветы Марковны является самостоятельной законченной научной квалификационной работой. В ней на основании выполненных автором исследований изложены новые научно-обоснованные результаты и решения, которые заключаются в разработке моделей для определения основных характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых печах и их программной реализации. Автором учтены разнообразные варианты конструкций электродуговых печей и применения в них постоянного и трехфазного переменного тока.

Диссертационная работа Костылевой Елизаветы Марковны и автореферат в полной мере отвечают требованиям п. 9-14 Положения ВАК, а ее автор **заслуживает** присуждения ученой степени *кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)*.



Профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий и
электротехнологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет
«МЭИ»

Генеральный директор ООО «Научно-производственная фирма КОМТЕРМ»,
д.т.н.


_____ **Нехамин Сергей Маркович**

Подпись Генерального директора ООО «Научно-производственная фирма
КОМТЕРМ», С.М. Нехамина заверяю:

Операционный менеджер

 / А.А.Зубарева/

