

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора
Баркалова Сергея Алексеевича
на диссертационную работу **Костылевой Елизаветы Марковны**
«Модели и алгоритмы для определения характеристик электрических дуг
в многоэлектродных дуговых печах», представленную на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 –
Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность).

Актуальность темы

В промышленности нашей страны достаточно широко распространены различные технологии с использованием нескольких параллельно горящих электрических дуг. Типичными примерами являются: дуговые и плазменные печи для выплавки черных и цветных металлов; установки вакуумно-дугового переплава для получения высококачественных слитков; рудотермические и рудовосстановительные печи для обогащения руд и получения ферросплавов. Поскольку дуга является довольно сложным объектом как для изучения, так и для управления ее работой, то вполне естественно, что когда мы имеем несколько параллельно горящих дуг, сложность поведения такой системы существенно возрастает, прежде всего из-за электромагнитного взаимодействия токов, проходящих через дуги и токоподводы. В научно-технической литературе рассматривается множество самых разнообразных вопросов, связанных с исследованиями поведения дуг и т.п., например, силы, действующие на вертикальную дугу постоянного тока с горизонтальным токоподводом, динамическое воздействие на электроды дуговой печи, работающей на трехфазном переменном токе, и пр. Однако некоторые данные из разных научных работ порой оказываются противоречивыми, а также неясно из каких источников полученными. Кроме того бывает что в них недостаточно полно проанализированы интегративные качества системы взаимодействующих дуг. Знание характера сил, действующих на дугу, ее форма, положение и поведение являются важным при конструировании и эксплуатации промышленных печей. Это служит источником повышения эффективности управления и автоматизации их работы.

В диссертационной работе систематизированы и обобщены существующие разработки как отечественных, так и зарубежных ученых, а также получены новые данные в области создания моделей и алгоритмов поведения дуг в условиях работы многоэлектродных промышленных агрегатов.

Все это на практике позволит совершенствовать существующие конструкции многодуговых агрегатов, методы управления в них технологическими процессами и прогнозирование надежности их работы.

В целом диссертационное исследование, направленное на повышение эффективности работы современных промышленных агрегатов, является вполне актуальным и имеет важное народнохозяйственное значение.

Перечень поставленных в работе задач и полученных результатов соответствует шифру выбранной научной 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.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, и заключения, где представлены основные выводы и результаты диссертационного исследования, списка библиографических источников из 152 наименований. Диссертация содержит 173 страницы основного текста, включая 77 рисунков, 6 таблиц и 4 приложения.

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы.

В главе один «Использование электрических дуг в промышленных агрегатах. Обзор математических моделей, определяющих электромагнитные и тепловые характеристики электрической дуги постоянного и переменного тока» показаны современные промышленные агрегаты, где в качестве источника тепловой энергии используются несколько параллельно горящих электрических дуг постоянного и трехфазного переменного тока, в том числе трехэлектродные и шестиэлектродные печи.

Приведено описание электрических, магнитных, силовых и гидродинамических процессов, протекающих в дугах постоянного и переменного тока. Показаны существующие математические модели и алгоритмы по определению силовых параметров дуг и теплового излучения при их электромагнитном взаимодействии.

Проведенный автором литературный обзор показал, что нет системного анализа поведения и роли отдельных электромагнитных сил и совместного их интегрального действия на электрическую дугу, а также роли локальных сил, действующих на отдельные ее элементы. Нет моделей и алгоритмов, позволяющих определять тепловое излучение от нескольких электрических дуг постоянного и трехфазного переменного

тока. Из литературы известны математические модели по определению формы осей двух параллельно горящих электрических дуг при их электромагнитном взаимодействии, однако из-за сложности моделей не разработаны алгоритмы для расчета поведения трех дуг трехфазного переменного тока в зависимости от расположения и геометрии электродов. Исходя из этого были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В главе два «Исследование напряженности магнитного поля вблизи дуг постоянного и трехфазного переменного тока и поведение основных электромагнитных сил, действующих на дугу».

С использованием системного анализа рассмотрены модели для расчета распределения напряженности магнитного поля вблизи электрических дуг постоянного и трехфазного переменного токов, а также математические модели для определения основных электромагнитных локальных и среднеинтегральных сил, действующих на дугу. При помощи компьютерного моделирования проведено исследование поведения магнитных полей вблизи одиночной электрической дуги и трех дуг.

Рассмотрено влияние на электрическую дугу ряда основных электромагнитных сил: со стороны токов, протекающих между дугами через жидкий металл; токов, протекающих через токоподводящие электроды и другие дуги; взаимодействия дуги с собственным магнитным полем, возникающими при этом силами сжатия дуги (пинч-эффект) и выпрямляющие ее при изгибе.

Проведен анализ поведения векторов основных среднеинтегральных электромагнитных сил, действующих на дугу постоянного тока и электрическую дугу в условиях трехфазной дуговой печи. Дано описание созданных программных модулей *«Магнитное поле вблизи дуг»* для определения магнитных полей и *«Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи»* для определения основных электромагнитных сил. Приведены результаты компьютерного моделирования магнитных полей и основных электромагнитных сил в трехфазной дуговой печи.

В главе три «Форма электрических дуг постоянного и переменного тока при их электромагнитном взаимодействии». Исходя из равенства электромагнитной и центробежной силы, получено уравнение равновесия для оси столба дуги при взаимодействии двух дуг постоянного тока. Предложено три эмпирических алгоритма для решения интегродифференциального уравнения электромагнитного равновесия для нахождения формы осей двух параллельно горящих дуг постоянного тока. Получено более общее уравнение равновесия элемента столба дуги при его электромагнитном взаимодействии с одной или двумя дугами постоянного или переменного токов. Дано описание созданного программного модуля *«Форма осей электрических дуг»*, позволяющего рассчитывать и визуализировать форму осей двух или трех дуг

постоянного или трехфазного переменного токов при их электромагнитном взаимодействии.

Даны результаты моделирования положения осей аргоновых дуг для случая взаимодействия двух дуг и для трех, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, дуг, горящих между вертикальными электродами и горизонтальной токоподводящей поверхностью.

В главе четыре «Математическое моделирование теплового излучения от электрических дуг, расположенных под углом к горизонтальной поверхности». На основе результатов, полученных во 2 и 3 главах, диссертант заключает, что в трехфазной печи за счет электромагнитного взаимодействия электрических токов, протекающих по графитированным электродам и в поверхностных слоях расплава, происходит выдувание дуги от центра распада электродов. Расчеты, полученные в 3 главе, и данные, полученные из литературных источников на основе исследований на промышленных печах показывают, что средний угол наклона столба дуги θ по отношению к нормали зеркала ванны для ДСП различной мощности и емкости колеблется в пределах 45° – 65° . Была поставлена задача по определению падающего теплового потока от электрической дуги, расположенной под углом к тепловоспринимающей поверхности, на линию, образованную пересечением поверхности ванны и перпендикулярной ей плоскости, проходящей через ось дуги. Далее решалась более общая задача по определению теплового потока от наклонной дуги на произвольную горизонтальную площадку.

Разработан программный модуль «*Расчет тепловых потоков от наклонных дуг*», позволяющий рассчитывать и визуализировать тепловые потоки, падающие на горизонтальную поверхность, вблизи горения трех наклонных электрических дуг. Показаны результаты моделирования для ДСП-180 ОАО «ММК» при максимальной полной мощности 150 МВА.

Следует отметить, что выводы по главам, а также **основные выводы и результаты диссертационного исследования** вполне логичны и обоснованы. Полученные результаты исследования позволяют утверждать, что соискателем для выбранного объекта проведено целостное и завершенное научное исследование.

Новизна полученных результатов заключается в следующем: 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. Впервые созданы численные эвристические алгоритмы для нахождения усредненной по времени 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.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Работа представляет собой комплексное исследование, основанное на использовании современных методов в области системного анализа. Она базируется на известных и апробированных математических и численных методах, а также сравнении полученных результатов с известными из научно-технической литературы экспериментальными данными и результатами исследований, выполненных автором на промышленной дуговой печи. Достоверность работы подтверждена экспериментальными данными, полученными в производственных условиях на действующем оборудовании, контролируемом современной аналитической аппаратурой, с получением положительных результатов.

Значимость результатов, полученных автором диссертации, для практики

Предложенные в диссертационной работе алгоритмы позволяют совершенствовать существующие методы принятия решения по определению положения электрических дуг в системах автоматизированного регулирования тепловой работы многодуговых промышленных агрегатов. Созданный комплекс программного обеспечения 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.

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).

Публикации и апробация работы

Основные положения диссертации опубликованы в 33 печатных работах, в том числе в 9 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьях в изданиях, индексируемых в международной базе данных SCOPUS, имеются также 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

На протяжении ряда лет материалы работы докладывались и обсуждались на научных конференциях разного уровня.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения. Публикации в открытой печати в достаточной

степени раскрывают содержание диссертации и характеризуют личный вклад автора.

Замечания по работе

1. На странице 74 диссертации утверждается, что формула (2.33) для определения среднеинтегральной силы совпадает с аналогичной формулой, полученной в работе А.В. Егоровым с точностью до коэффициента. Необходимо пояснить, почему при этом коэффициенты разные.
2. Реальные токи в дуговых печах имеют несинусоидальную и несимметричную форму и могут содержать не только высшие, но и мультигармонические и даже дробные составляющие. Частоты гармоник могут быть существенно выше промышленной частоты (страница 90). Автор везде принимает, что переменный ток изменяется по гармоническому закону. Следует пояснить, каким образом это допущение оказывает влияние на расчет магнитного поля вблизи электродов печи и основных электромагнитных сил, действующих на дугу.
3. В разделе 3.1.4 предложены три алгоритма решения интегро-дифференциального уравнения равновесия для оси столба дуги. Видно, что первый алгоритм является частным случаем второго, а второй – частным случаем третьего. В работе не указано проводилась ли проверка на логическую непротиворечивость предлагаемых алгоритмов, в частности, решалась ли задача для первого алгоритма вторым и для второго алгоритма – третьим.

Все рассмотренные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Костылевой Е.М.

Необходимо отметить, что автор диссертации продемонстрировала высокую квалификацию и эрудицию, а также умения и навыки в области математического моделирования сложных электромагнитных и теплофизических процессов. Всесторонне рассмотрены сложные технические объекты, такие как системы нескольких дуг и др.

Результаты работы достаточно полно опубликованы в научной печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Научная новизна и практическая ценность подтверждены актом внедрения.

Заключение

Содержание диссертации Костылевой Е.М. в полной мере соответствует паспорту специальности 05.13.01. Диссертация является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические решения, заключающиеся в систематизации и обобщении существующих разработок, а также получении новых моделей и алгоритмов поведения электрических дуг в условиях работы многоэлектродных промышленных агрегатов. В работе решена важная народнохозяйственная задача создания моделей и

алгоритмов для определения характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых печах.

Диссертационная работа Костылевой Елизаветы Марковны соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, п. 9-11, 13-14, а ее автор **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)».

Официальный оппонент:

декан факультета экономики, менеджмента
и информационных технологий,
заведующий кафедрой управления ФГБОУ
ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
доктор технических наук,
профессор



Сергей Алексеевич Баркалов

«24» ноября 2020 г.

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
Тел. 8 (473) 2-76-40-07
email: u00740@vgasu.vrn.ru

Подпись Баркалова С.А. заверяю

И.о. проректора по научной работе



И.П. Дроздов