

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора Куликова Геннадия Григорьевича на диссертационную работу Костылевой Елизаветы Марковны «МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ В МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность).

Актуальность темы

В соответствии с концепцией промышленной революции Industry 4.0, цифровизация и автоматизация производственно – технологических процессов являются базовыми факторами нового мирового технологического уклада. Системный анализ и математическое моделирование – основные составляющие эффективного проектирования новых и модернизации существующих производственно – технологических процессов, включая электро – химические, металлургические и другие физические процессы. Необходимо также отметить, что процесс системного моделирования является интеллектуальным, трудоемким исследовательским процессом. Формируемая в настоящее время методология системной инженерии, продуктом которой в первую очередь является создание информационной модели реальных или виртуальных технологических объектов производства (оборудования, инструмента, самих технологий и др.) по аналогии с общей инженерией в области технической деятельности должна удовлетворять и V-образной структуре верификации моделей. То есть модели в течение их жизненного цикла должны регулярно развиваться и проверяться путем оценки степени соответствия их структуры и параметров реальным объектам. Сегодня также существуют условия совместного решения задачи системного моделирования технологических объектов с учетом их внутренней (физической) структуры. В настоящее время в литературе такие модели принято называть цифровыми двойниками.

В отечественной металлургической промышленности широко применяются технологии выплавки черных и цветных металлов с использованием нескольких параллельно горящих электрических дуг. Известно, что электрическая дуга, как технологический инструмент, сама по себе является сложным электро – физическим, термическим, динамическим объектом при управлении ее состоянием в технологическом процессе. Сложность применения нескольких дуг в одном процессе плавки возрастает, прежде всего, из-

заэлектромагнитного взаимодействия их электро – магнитных и тепловых полей. Представленные в научно-технической литературе методы проектирования технологий с системой дуг основываются, как правило, на известных эмпирических зависимостях.

Существующие сегодня информационные технологии, позволяют моделировать физические процессы, описываемые нелинейными уравнениями в частных производных и обыкновенными уравнениями, агрегировать их решения и получать новые, более точные системные математические модели технологических процессов плавки.

Для решения данной задачи необходимо упорядочить и формализовать структуры производственных и технологических процессов плавки с учетом их технологической памяти, собрать и обобщить соответствующие данные, разработать структуру и определить параметры математических моделей и обосновать применяемые методы моделирования (решения).

Именно в такой постановке, решаемая в диссертации научно-техническая задача разработки моделей и алгоритмов для определения характеристик электрических дуг, как технологических инструментов, в многоэлектродных дуговых печах и создание на их основе специального математического и алгоритмического обеспечения, является актуальной и своевременной.

Оценка структуры и содержания работы и соответствие автореферата диссертации ее содержанию

Содержание и структура диссертации соответствуют цели исследования и критерию внутреннего единства, что подтверждается сформированным автором подхода и системного анализа структур подсистем технологических процессов и производственной среды, и закономерностей их функционального взаимодействия. В диссертации представлены предложенные автором новые методические и теоретические положения, свидетельствующие о вкладе диссертанта в теорию систем и системного анализа, в теорию математического моделирования сложных электро – физических процессов в металлургии.

В практическом плане диссертационное исследование направлено на повышение эффективности работы современных промышленных агрегатов в металлургии.

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.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 152 наименований, содержит 173 страницы основного текста, включая 77 рисунков, 6 таблиц, 4 приложения.

Во введении обосновывается актуальность поставленных задач, заявляется научная новизна и практическая значимость результатов.

В первой главе проведен обзор математических моделей, для определения электромагнитных и тепловых характеристик электрической дуги постоянного и переменного тока как инструмента плавки и управляемого объекта одновременно. Выполнен анализ структуры и основных характеристик трехэлектродных и шестиэлектродных печей, определяющих основные структурные и параметрические условия функционирования дуги в процессе плавки.

Проведен анализ существующих математических моделей и алгоритмов расчёта силовых параметров дуг и теплового излучения при их электромагнитном взаимодействии.

Осуществленный автором обзор научно-технической литературы показывает отсутствие адекватных современным потребностям производства моделей и алгоритмов требуемой точности, позволяющих рассчитывать тепловое излучение от нескольких электрических дуг постоянного и трехфазного переменного тока.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе разработаны математические модели в форме сложной нелинейной алгебро-дифференциальной системы уравнений для расчета распределения напряженности магнитного поля вблизи электрических дуг постоянного и трехфазного переменного токов и для определения основных электромагнитных локальных и среднеинтегральных сил, действующих на дугу. Путем компьютерного моделирования проведено исследование характеристик магнитных полей вблизи одиночной электрической дуги и трех дуг. Исследованы эффекты возникающие при сжатии дуги (пинч-эффект) и выпрямляющие при изгибе. Приведено описание разработанных 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.

В третьей главе разработаны алгоритмы для решения интегро-дифференциального уравнения электромагнитного равновесия для нахождения формы осей двух параллельно горящих дуг постоянного тока. Составлены уравнения для определения условий равновесия элементов столба дуги при его электромагнитном взаимодействии с одной или двумя дугами постоянного или переменного токов. Дано описание созданного соответствующего программного модуля «*форма осей электрических дуг*». Приведены результаты моделирования.

В четвертой главе поставлена и решена задача расчёта параметров 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.

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.

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 получена системная математическая модель в форме сложной нелинейной алгебро - дифференциальной системы уравнений, включающая новые аналитические формулы и приближенный алгоритм расчета для определения напряженности магнитного поля вблизи нескольких электрических дуг постоянного или переменного токов, горящих на горизонтальную поверхность;
- для основных промышленных металлургических агрегатов с использованием компьютерного моделирования проведено исследование наиболее важных характеристик электромагнитного взаимодействия электрических дуг и их теплового излучения при горении на горизонтальную поверхность. Получено распределение теплового потока по горизонтальной поверхности при привязке на нее трех электрических дуг трехфазного тока с учетом их электромагнитного взаимодействия;

–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.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

В диссертационной работе предложен новый системный расчетно-экспериментальный метод компьютерного моделирования сложных электро – магнитных и тепловых процессов в технологическом процессе плавки металла дугами. Это является существенным обобщением и системным развитием известных традиционных, в основном эмпирических, способов и методов. Основные технологические структуры, математические уравнения и соотношения не противоречат базовым положениям системного анализа и системной инженерии, теории моделирования электро – магнитных и тепловых процессов и др. Используемые аналитические и аппроксимирующие зависимости соответствуют известным законам и закономерностям электро – магнитной теории, материаловедения и др.

Отличия модельных и экспериментальных данных, полученные в ходе исследований находятся в пределах точностей, задаваемых техническими регламентами, что так же подтверждает достаточную степень адекватности и достоверности предложенных моделей и алгоритмов.

Результаты работы не противоречат известным работам других специалистов в области металлургии и системного моделирования.

Значимость результатов, полученных автором диссертации, для практики

Предложенные в диссертационной работе алгоритмы позволяют совершенствовать существующие методы проектирования новых более эффективных режимов плавки, используя расчетные данные эффективного положения электрических дуг в системах автоматизированного управления многодуговыми промышленными агрегатами.

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 9 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьях проиндексированных в международной базе SCOPUS, имеются также

2свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Указанные публикации достаточно полно раскрывают содержание диссертации и характеризуют личный вклад автора.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения и результаты.

Замечания по работе

1. В выводе шесть к главе 2 указывается, что «посредством компьютерного моделирования проанализировано поведение векторов локальных и среднеинтегральных электромагнитных сил вблизи трех дуг трехфазного переменного тока в зависимости от геометрических характеристик дуг». Однако в главе 2 имеется анализ поведения только среднеинтегральных сил, не является ли это противоречием.
2. В 4 главе рассматривается модель падающего теплового потока от электрической дуги на линию, образованную пересечением поверхности ванны и плоскости, проходящей через ось дуги, геометрически моделируемой линией. Это допущение требует дополнительного обоснования. Так как в дуге принято выделять столб дуги и пламя дуги, имеющие вполне конкретные размеры.
3. В целом, можно констатировать, что результаты системного и аналитического анализа закономерностей приформировании математической модели дуг с учетом этапов проектирования, производства и эксплуатации (реализации) плавки достаточно полно формализованы и представимы в «компьютерной (цифровой форме)» и позволят создать системную модель всего технологического процесса (ТП), удовлетворяющего известным требованиям цифрового двойника (ЦД). Автору следовало бы сформулировать необходимые требования к информационной инфраструктуре цифровой платформы и указать на открывающуюся возможность применения современных экспертных систем, нейронных сетей, статистических методов класса шесть–сигма и др. на основе ЦД ТП.
4. К сожалению разработанные теоретические и методические положения и соответствующие модели и алгоритмы представлены на общепринятых инженерно–математических языках, что вызовет дополнительные трудности при их автоматизации и применении. Целесообразно было бы использование рекомендуемых для этих целей ГОСТ в машиностроении языков CASE технологий, например OWL, EXPRESS, IDEF, BPMN и др.

В качестве пожелания и рекомендации для дальнейшего развития предложенных методов и моделей можно отметить создание теории ЦД ТП в металлургии.

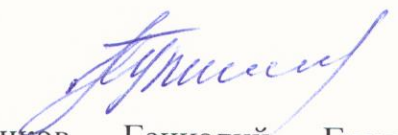
Заключение

На основании анализа диссертационной работы и других представленных материалов считаю, что диссертация Костылевой Е.М.представляет собой

законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые модели и алгоритмы для системного исследования и определения характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых печах.

Диссертация полностью отвечает требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям и определенным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г., а ее автор Костылева Елизавета Марковна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)».

Профессор кафедры «Автоматизированные
системы управления» ФГБОУ ВО
Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
доктор технических наук, профессор


Куликов Геннадий Григорьев

Адрес: 450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», кафедра «Автоматизированные системы управления»

Тел.: + 7 (347) 272-63-07

E-mail: gennadyg_98@yahoo.com

