

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по науке «Уральский
федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»,
д-р физ.-матем. наук
Германенко А.В.

«17» ноября 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу **Костылевой Елизаветы Марковны**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка ин-
формации (промышленность)» на тему: **«Модели и алгоритмы для опре-
дления характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых
печах»**

Актуальность темы диссертации

Промышленные агрегаты, использующие в качестве источника тепловой
энергии электрические дуги, широко применяются в современной промыш-
ленности – в черной и цветной металлургии и др. Отметим, что в зависимо-
сти от конкретной технологии могут использоваться как свободно горячие,
так и обжатые дуги. Также в зависимости от условий в них может приме-
няться постоянный или трехфазный переменный ток. В любом случае при
эксплуатации агрегата с мощными электрическими дугами, возникает ряд
проблем, связанных с соблюдением норм охраны труда, норм экологической
безопасности, достижением требуемых экономических показателей.

Решение перечисленных проблем в виде формализованных алгоритмов
необходимо на всех стадиях жизненного цикла рассматриваемых агрегатов.
На стадии проектирования и модернизации агрегатов – в составе систем ав-
томатизированного проектирования (САПР); на стадии технологической
подготовки производства – в составе систем автоматизированной технологи-
ческой подготовки производства (АСТПП); на стадии ведения технологиче-
ского процесса – в составе систем поддержки принятия решений (СППР).

Диссертационная работа Костылевой Елизаветы Марковны посвящена
системному рассмотрению основных характеристик электрических дуг в
многоэлектродных дуговых печах. Рассматриваемые режимы функциониро-
вания зависят от многочисленных факторов, обусловленных как конструкци-
ей печи, так и параметрами конкретного технологического процесса. В част-

ности, характер и интенсивность электромагнитных взаимодействий являются важнейшими факторами, от которых зависит эффективность тепловой работы печи, износ футеровки, износ электродов. По сути, они и являются основными факторами, определяющими технико-экономическую эффективность работы агрегата. В работе предложены алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие совершенствовать существующие методы принятия решений, находить рациональные режимы работы многодугового агрегата. Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что работа является актуальной.

Перечень поставленных в работе задач и полученных результатов соответствует шифру выбранной научной специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)», в частности, по пунктам:

- 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.

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

В первой главе «Использование электрических дуг в промышленных агрегатах. Обзор математических моделей, определяющих электромагнитные и тепловые характеристики электрической дуги постоянного и переменного тока» рассмотрены принципы использования электрических дуг в современных промышленных агрегатах. При проведении анализа существующих агрегатов применена классификация по двум принципам: по роду электрического тока – постоянный или переменный трехфазный; по тепловому действию дуги – прямое или косвенное. Рассмотрены современные отечественные и зарубежные конструкции. Показаны особенности вакуумных дуговых печей (с нерасходуемым водоохлаждаемым электродом, с расходуемым водоохлаждаемым электродом, с двумя расходуемыми электродами). Описаны основные параметры и математические модели дуг постоянного и переменного тока. Показана необходимость создания алгоритмов для определения параметров электрических дуг с учетом функционирования агрегатов с несколькими параллельно горящими дугами.

Вторая глава «Исследование напряженности магнитного поля вблизи дуг постоянного и трехфазного переменного тока и поведение основных электромагнитных сил, действующих на дугу» посвящена компьютерному моделированию поведения магнитных полей вблизи электрических дуг. Исследована напряженность магнитного поля вблизи дуги постоянного тока, напряженность магнитного поля вблизи параллельно горячих электрических дуг трехфазного переменного тока. Установлено, что вблизи электродов наблюдается бегущее магнитное поле. Исследованы основные электромагнитные силы, действующие на дугу. Установлено, что результирующая электромагнитная сила отклоняется от оси, соединяющей ось электрода и центр диаметра распада электродов. Предложены алгоритмы для выполнения расчетов параметров электромагнитных полей вблизи дуг трехфазного переменного тока. Алгоритмы программно реализованы в средах Matlab и MathCAD. Проведено компьютерное моделирование магнитных полей и составляющих электромагнитных сил, действующих на дугу от основных геометрических и технологических параметров.

Третья глава «Форма электрических дуг постоянного и переменного тока при их электромагнитном взаимодействии» посвящена математическому моделированию формы электрических дуг. Рассмотрена модель для определения формы двух параллельно горячих на горизонтальную поверхность постоянного тока в зависимости от сил, действующих на дуги и от теплофизических параметров горения дуги, далее она расширена для случаев нахождения формы осей двух или трех дуг постоянного или переменного тока.

Модель для определения формы осей при взаимодействии дуг в общем виде сводится к системе интегро-дифференциальных уравнений. Для ее решения использовались эвристические или эмпирические методы. Предложенные зависимости formalizованы в виде алгоритмов и реализованы программно в среде математического пакета Matlab. Проведен численный эксперимент, в результате которого установлено, что углы отклонения дуг от вертикали в сравнении с известными экспериментальными данными не превышают десяти процентов.

Четвертая глава «Математическое моделирование теплового излучения от электрических дуг, расположенных под углом к горизонтальной поверхности» посвящена разработке, алгоритмизации и программной реализации моделей теплового излучения на горизонтальную поверхность от дуг постоянного или переменного трехфазного тока. Была получена зависимость для определения теплового потока на произвольную горизонтальную площадку. Также разработаны зависимости для определения теплового потока излучения от трех наклонных электрических дуг горизонтальную площадку.

На основе предложенных моделей произведена алгоритмизация и реализован комплекс программ для изучения электромагнитного взаимодействия

параллельно горящих электрических дуг и их тепловых потоков излучения. Проанализирована адекватность предлагаемых математических моделей и алгоритмов для расчета формы дуг. Для этого были собраны результаты измерений температуры охлаждающей воды, выходящей из боковых водоохлаждаемых панелей, что позволило изучить косвенное влияние интенсивности электрических дуг на тепловосприятие боковой стенки печи. Установлено, что максимальные температуры немного отклонены от линии, соединяющей центр распада электродов и ось электрода, что соответствует факту, показывающему, что равнодействующая электромагнитная сила отклонена от линии, соединяющей ось электрода с центром диаметра распада электродов.

Новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы для определения напряженности электромагнитных полей вблизи промышленных электродуговых печей постоянного и трехфазного переменного тока.
2. Впервые разработан и реализован программно-эмпирический алгоритм для нахождения формы осей столбов при электромагнитном взаимодействии двух или трех дуг для постоянного и трехфазного переменного тока.
3. Впервые получено распределение теплового потока излучения по горизонтальной поверхности при привязке на нее трех вертикальных электрических дуг трехфазного тока с учетом их электромагнитного взаимодействия.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

Обоснованность подтверждается соответием результатов, полученных с использованием разработанных автором алгоритмов, и результатов экспериментальных исследований, полученных на промышленной дуговой печи. Кроме того, результаты численного моделирования с приемлемой для практики точностью согласуются с результатами, приведенными в научно-технической литературе.

Значимость результатов, полученных автором диссертации, для практики

Разработанное на основе диссертационного исследования программное обеспечение может быть использовано в составе САПР при разработке и реконструкции промышленных агрегатов, в составе АСТПП – при технологической подготовке новых и модернизации существующих технологических процессов, в составе СППР – в процессах проектирования, технологической подготовки производства. Положения и разработки диссертационного исследования (разработанные модели, алгоритмы и программное обеспечение) внедрены в практику работы ООО РМЗ «НИХАРД-СЕРВИС» в г. Златоусте.

Публикации и апробация работы

По теме диссертации опубликованы 33 работы, в том числе девять публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, три проиндексированы в международной базе SCOPUS, получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

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 Всероссийской 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).

По содержанию работы имеются следующие **замечания**:

1. При решении уравнения 3.12 (с. 104) автором справедливо указано, что данное интегро-дифференциальное уравнение должно решаться численно. При этом предложена полиномиальная аппроксимация искомого решения с последующей минимизацией функции невязки. Однако не обоснован выбор данного метода и достаточная для практики степень полинома, описывающая форму дуги.

2. При поиске неизвестных коэффициентов полинома для минимизации целевой функции автор использует метод Левенберга-Марквардта (с. 106). Однако никак не обоснован выбор данного численного метода. На наш взгляд, более эффективным был бы поиск минимума с помощью какого-либо из эволюционных методов, позволяющих при достаточном размере популяции более эффективно находить минимум функции.

3. Часть программ из разработанного автором комплекса была написана в среде Matlab, а часть в среде MathCAD. Если говорить о перспективах дальнейшего применения в системах автоматизации, то программы для Matlab могут быть конвертированы, например, в программы на Python, C++ и для этого имеются соответствующие пакеты, а с MathCAD все обстоит намного сложнее. Остается непонятным использование комплекса программ двух существенно отличающихся пакетов, тем более что все инструменты, что имеются в MathCAD, есть и в Matlab.

Все рассмотренные замечания лишь в незначительной степени снижают общие положительные оценки диссертации Е.М. Костылевой.

Основные положения и результаты диссертационной работы достаточно полно представлены в научных публикациях автора, в том числе в 9 статьях в журналах рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Диссертация Костылевой Елизаветы Марковны является самостоятельной законченной научно-квалифицированной работой. В ней на основании выполненных автором исследований изложены новые научно-обоснованные технические решения, заключающиеся в разработке и программной реализации алгоритмов определения основных характеристик электрических дуг в многоэлектродных дуговых печах. Автором рассмотрены наиболее используемые варианты применения дуг постоянного и трехфазного переменного тока.

Полученные автором результаты могут быть использованы при разработке и корректировке существующих технологических инструкций для персонала, обслуживающего электродуговые агрегаты. Также они могут быть использованы при разработке и корректировке нормативных документов, регламентирующих проектирование и совершенствование конструкции электродуговых агрегатов, методов управления технологическими процессами и прогнозирование надежной их работы.

С учетом применения современных информационных технологий, разработанные программные продукты могут быть адаптированы для применения в составе систем автоматизированного проектирования, систем автоматизированной технологической подготовки производства и систем поддержки принятия решений.

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

Диссертационная работа и отзыв обсуждены на заседании кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента Б.Н. Ельцина (Протокол №13 от 12 ноября 2020 года).

Отзыв подготовили: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО УрФУ, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ Спирин Николай Александрович. Докторская диссертация защищена по специальности: 05.16.02 – Металлургия черных, цвет-

ботник высшей школы РФ Спирин Николай Александрович. Докторская диссертация защищена по специальности: 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов; доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО УрФУ, доцент, почетный работник сферы образования РФ Лавров Владислав Васильевич. Докторская диссертация защищена по специальности: 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (металлургия).

Доктор технических наук,
заслуженный работник высшей школы РФ,
заведующий кафедрой «Теплофизика
и информатика в металлургии» УрФУ,
профессор

Спирин Николай Александрович

Тел.: +7 (343) 375-48-15,
E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

Доктор технических наук,
почетный работник сферы образования РФ,
профессор кафедры «Теплофизика и
информатика в металлургии», доцент

Лавров Владислав Васильевич

Тел.: +7 (343) 375-44-51,
E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Сокращенное наименование организации	ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый индекс, адрес организации	Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28
Телефон	7 (343) 375-48-15; 375-44-51
Адрес электронной почты	inmt@urfu.ru
Сайт организации	https://inmt.urfu.ru , https://urfu.ru/ru

Подпись Спирина Н.А.
Ученый секретарь УрФУ
Лаврова В.В. заверю
Лаврову Олеес Н.Н.