

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«Донбасский государственный технический институт»

На правах рукописи

Кухарев Алексей Леонидович

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ**

Специальность 05.02.13 –Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Алчевск – 2021

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего образования Луганской народной Республики «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Научный консультант: **Мирошников Вадим Владимирович**
доктор технических наук, профессор, ГОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», проректор по научно-учебной работе

Официальные оппоненты: **Терентьев Дмитрий Вячеславович**
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», директор института элитных программ и открытого образования, профессор кафедры машин и технологии обработки давлением и машиностроения

Снитко Сергей Александрович
доктор технических наук, доцент, ГОУ ВПО ДНР «Донецкий национальный технический университет», заведующий кафедрой обработки металлов давлением

Бабанин Анатолий Яковлевич
доктор технических наук, доцент, ГОУ ВПО ДНР «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Защита состоится «11» июня 2021 г. в 11-00 на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» в читальном зале по адресу: г. Алчевск, ул. Ленинградская 45-а, библиотека.

Автореферат разослан « 30 » 03 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Евгений Сергеевич Смекалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На предприятиях черной и цветной металлургии одной из наиболее насущных проблем является повышение энергоэффективности плавильных и восстановительных процессов, осуществляемых с помощью многоэлектродных печных агрегатов большой емкости, установленная мощность которых на сегодняшний день может превышать 100 МВА при токах в 80-150 кА.

Дальнейшее развитие металлургических агрегатов возможно только лишь при комплексном исследовании явлений, происходящих в элементах их конструкций, системах энергопитания, а также в их рабочем пространстве, в том числе в жидких средах, состоящих из расплавов выплавляемых продуктов и шлаков. При этом важнейшими являются взаимосвязанные между собой процессы передачи энергии во вторичном токоподводе и электродах, процессы теплогенерации и тепломассообмена в ваннах агрегатов.

В то же время подавляющая часть трехэлектродных печных агрегатов, работающих на переменном токе промышленной частоты, характеризуется значительным потреблением реактивной электроэнергии. За счет проявления скин-эффекта и эффекта близости в электродах и в расплаве имеет место существенная неоднородность тепловых полей. Эти факторы приводят к повышенному износу электродов и снижению технико-экономических показателей технологического процесса. В настоящее время энергозатраты при выплавке стали составляют 300-500 кВт·ч/т, а при выплавке ферросплавов – 500-15000 кВт·ч/т.

Качественное и энергоэффективное проведение технологических процессов в многоэлектродных печных агрегатах предлагается осуществлять с использованием гибкого управления энергетическими потоками в процессе плавки, в том числе с использованием различных магнитогидродинамических (МГД) эффектов, из которых наиболее эффективными являются так называемые электровихревые течения (ЭВТ), обусловленные взаимодействием протекающего в расплаве тока с собственным магнитным полем. В отличие от пневматического перемешивания эти течения обладают существенными преимуществами, такими, как бесконтактное воздействие на потоки расплава, интенсивное перемещение вглубь ванны высокотемпературных зон, образующихся в областях электрических дуг, а также вихревой характер течений, циркулирующих в большом объеме ванны печного агрегата. Несмотря на множество реализованных исследований, все еще остаются открытыми задачи управления структурой и интенсивностью ЭВТ за счет расположения электродов и параметров электромагнитных воздействий.

Таким образом, повышение энергоэффективности многоэлектродных металлургических агрегатов, совершенствование их конструкций и режимов энергопитания для интенсификации процессов тепломассообмена, опреде-

ляют актуальность развития научных и методологических основ проектирования, производства и эксплуатации таких агрегатов, что имеет важное научно-техническое и практическое значение.

Степень разработанности проблемы исследования. Значительный вклад в исследование и создание трехэлектродных печных агрегатов, традиционно питаемых током промышленной частоты, внесли ученые Н.В. Око-роков, И.С. Тельный, Б.М. Струнский, Г.А. Сисоян, Я.Б. Данцис, Г.М. Жилов, Л.А. Волохонский, Н.А. Марков, Б.Е. Патон, Ю.М. Миронов, К. Kruger, J.A. Bakken, J. Szekely, представители отечественных научно-исследовательских институтов, таких как ВНИИЭТО, НИИГИПРОХИМ, ЦНИИЧЕРМЕТ им. И.П. Бардина, ИМЕТ им. А.А. Байкова, «Сибэлектро-терм», а также профильных кафедр МИСиС, ДонНТУ, НМетАУ, НГТУ, МГТУ им. Г.И. Носова и др.

Разработке и исследованию печных агрегатов, работающих на токах пониженной частоты и постоянном токе, посвящены работы И.М. Ячикова, В.С. Малиновского, А.Н. Мироновой, С.М. Нехамина, В. Vowmana. Большой комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в этом направлении проведен фирмами Siemens-VAI, BSE, SMS Siemag, Danieli.

Анализ литературных источников показал, что большинство известных работ направлено на изучение процессов, протекающих в двух- и трехэлектродных агрегатах, а процессы, протекающие, например, в шестиэлектродных агрегатах с различным расположением сводовых и подовых электродов, все еще являются малоизученными, что сдерживает дальнейшее развитие новых конструкций и технологий, а также методов их проектирования.

Объект исследования – многоэлектродные металлургические агрегаты и технологические процессы в них.

Предмет исследования – физико-технические и технологические закономерности, конструктивные, электромагнитные, гидродинамические и тепловые параметры многоэлектродных металлургических агрегатов.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка научно обоснованных технических решений, методов расчета и выбора рациональных энергетических и конструктивных параметров мощных многоэлектродных металлургических агрегатов, обеспечивающих повышение энергоэффективности и интенсификацию тепломассообмена в рабочем пространстве, как основания для увеличения их производительности.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Обобщить научно-техническую информацию о современных направлениях совершенствования конструкций мощных печных агрегатов и методах экономии энергоресурсов. Выполнить анализ технологических процес-

сов и основных факторов, определяющих энергетические и технико-экономические показатели.

2. Разработать теоретические основы, схемотехнические и конструктивные решения для повышения производительности многоэлектродных агрегатов за счет интенсификации тепломассообмена в их рабочем пространстве и повышения пропускной способности токопроводящих систем.

3. Развить комплекс математических моделей сопряженных электромагнитных и тепловых процессов в многоэлектродных металлургических агрегатах. Произвести выбор и адаптацию модели турбулентности применительно к течениям расплава в рабочем пространстве металлургических агрегатов.

4. Разработать экспериментальную многоэлектродную электропечную установку и методику лабораторных исследований энергетических процессов. Подтвердить адекватность предложенных моделей путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

5. Провести численные исследования электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в элементах конструкций и в рабочем пространстве многоэлектродных агрегатов при постоянных и переменных электромагнитных полях, определить их рациональные режимные и конструктивные параметры.

6. Развить методические основы проектирования, конструирования и эксплуатации энергоэффективных электрометаллургических агрегатов. Произвести технико-экономическую оценку и внедрить полученные результаты.

Научная новизна исследования. Получили дальнейшее развитие научные основы увеличения производительности и повышения энергоэффективности мощных многоэлектродных металлургических агрегатов, заключающиеся в следующем:

1. Впервые предложена конструкция многоэлектродного металлургического агрегата, состоящего из трех сводовых и трех подовых электродов, в котором угол между осями смежных сводовых и подовых электродов составляет 60° . Обоснованы варианты энергопитания многоэлектродных агрегатов как постоянным, так и переменным током пониженной частоты в диапазоне 0,01-1 Гц, что позволяет увеличить вводимую активную мощность и интенсифицировать магнитогидродинамические и тепловые процессы в рабочем пространстве агрегата.

2. Развита математическая модель сопряженных электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в рабочем пространстве предложенных многоэлектродных агрегатов, учитывающая нестационарность тепловых потоков от электрических дуг при синусоидальных электромагнитных полях.

3. Установлены основные закономерности формирования обладающих

симметричными свойствами электромагнитных, гидродинамических и тепловых полей в ванне расплава, способствующие улучшению условий перемешивания и процессов теплопереноса. Установлено, что структура течений расплава – многовихревая: в области каждой электрической дуги формируются два нисходящих вихревых течения, а в области каждого подового электрода – восходящее вихревое течение, причем азимутальная закрутка течений в этих областях проявляется в виде трех пар вихрей, циркулирующих в горизонтальной плоскости.

4. Обнаружено явление повышения интенсивности вертикальных вихревых течений, циркулирующих между осью соответствующей электрической дуги и осью ванны, также обуславливающее перераспределение турбулентных зон в центральную область ванны при увеличении отношения диаметра распада электродов к диаметру ванны D_p/D_e в диапазоне значений 0,2 - 0,5. На основе установленных зависимостей параметров теплопереноса обоснован рациональный диапазон значений отношения $D_p/D_e - 0,4-0,5$, обеспечивающий улучшение условий перемешивания и равномерности распределения температуры в ванне печного агрегата.

5. Предложена совокупность основных критериев энергоэффективности, используемых в структуре циклического алгоритма выбора рациональных энергетических и конструктивных параметров металлургических агрегатов, применение которых обеспечит проектирование и создание агрегатов с высокими технико-экономическими показателями.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании системного подхода и выявлении закономерностей при взаимодействии электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в многоэлектродных металлургических агрегатах, в том числе в нестационарных условиях, а также в расширении, на основе полученных результатов, понимания характера их протекания.

Основные научные положения диссертации являются основой создания новых и совершенствования существующих многоэлектродных печных комплексов для металлургии, машиностроения и химической промышленности.

На основании использования предложенных схмотехнических и конструктивных решений, а также рациональных режимных параметров обеспечивается снижение температурной неоднородности в электродах и в рабочем пространстве металлургических агрегатов. В сравнении с трехэлектродными печными агрегатами, работающими без средств дополнительного перемешивания, мощность перемешивания в расплаве предложенного шестиэлектродного агрегата увеличивается более чем в 7 раз, что при принятых условиях моделирования обеспечивает объем застойных зон не более 5 % и приемлемое распределение теплового поля при коэффициенте вариации температуры не превышающем 6 %.

Разработанные энергоэффективные схмотехнические решения для энергоснабжения многоэлектродных печных агрегатов на базе преобразователей частоты обеспечивают управление ЭВТ и тепловыми потоками за счет изменения формы, частоты и фазы питающего тока по каждому электроду в процессе плавки. Разработаны и внедрены схмотехнические решения для обеспечения надежности функционирования электропечных комплексов.

Технические решения, предложенные для многоэлектродных печных агрегатов, за счет разгрузки токопроводящей системы по реактивной мощности и увеличения вводимой активной мощности не менее чем на 10 %, а также за счет интенсификации тепломассообмена в их рабочем пространстве позволяют повысить технико-экономические показатели плавки, а именно: для сталеплавильных печных агрегатов ожидаемое сокращение времени плавки – 4-6 минут, сокращение затрат на потребленную реактивную электроэнергию – 15-25 %, повышение производительности печного агрегата – 10-12 %.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач исследования с получением обладающих новизной результатов использован следующий комплекс базовых методов теоретического и экспериментального исследования: методы конечных элементов и конечных объемов для расчета параметров электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов; теория подобия для разработки лабораторной многоэлектродной установки; методы электрических и теплотехнических измерений при экспериментальных исследованиях; методы статистической обработки результатов численных и натуральных экспериментов; методы расчета электрических цепей для определения параметров передачи электрической энергии по элементам токопроводящих конструкций; методы физики газового разряда и численные методы решения уравнения Эленбааса-Геллера для столба электрической дуги; аналитические методы расчета конструктивных, тепловых и электромагнитных параметров; методы технико-экономического анализа предложенных схмотехнических и конструктивных решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формирование многовихревых вертикальных и азимутальных течений расплава в металлургических агрегатах с тремя сводовыми и тремя подовыми электродами, в которых угол между осями смежных сводовых и подовых электродов составляет 60° , при энергоснабжении их постоянным током или током пониженной частоты в диапазоне 0,01-1 Гц, позволяет улучшить условия температурной гомогенизации расплава при объеме застойных зон не более 5 % и при коэффициенте вариации температуры не более 6 %, а также повысить коэффициент мощности и производительность агрегатов на 10-12 %.

2. В многоэлектродных металлургических агрегатах эффективное управление тепловыми потоками при проведении технологического процес-

са обеспечивается с помощью предложенной двухконтурной схемы энергоснабжения при независимом управлении электромагнитными параметрами по каждому электроду.

3. Влияние тепловой конвекции при значениях чисел Ричардсона $Ri > 2$ приводит к ослаблению нисходящих ЭВТ в областях электрических дуг, уменьшению коэффициентов теплопередачи в расплаве на 5-18 %, а также формированию дополнительных вихревых течений вблизи боковых стенок печного агрегата при $D_p/D_e < 0,25$.

4. При выборе соотношения D_p/D_e в рациональном диапазоне значений 0,4-0,5 в шестиэлектродных агрегатах объем застойных зон в расплаве уменьшается более чем на 40 %, а коэффициенты теплопередачи увеличиваются более чем на 10 % в сравнении с базовым вариантом расположения электродов (при $D_p/D_e \approx 0,2$).

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследований и выводов подтверждается: корректностью используемых допущений; постановкой рассматриваемых задач в рамках выполнения фундаментальных законов сохранения массы, энергии, импульса и электрического заряда; удовлетворительным согласованием результатов теоретических исследований с известными экспериментальными данными, а также с результатами собственных экспериментальных исследований, проводимых с использованием поверенных средств измерительной техники. Числовые значения отклонений расчетных и экспериментальных данных не превышают 17 %.

Основные результаты докладывались и обсуждались на: IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami (Przemyśl, 2013); XXIX международной научно-практической конференции «Современные проблемы гуманитарных и естественных наук» (Москва, 2016); международных научно-практических конференциях «Открытые физические чтения» (Луганск, 2016-2019 г.г.); VIII Международной конференции «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии» (Ижевск, 2019), V Международной научной конференции «Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности» (Донецк, 2020).

Реализация результатов исследований. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены на Стахановском заводе ферросплавов, а также на электротехническом заводе «Вектор» (Российская Федерация). Разработки по теме исследований использованы в учебном процессе Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

Публикации. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы опубликованы в 26 научных работах, из них: 2 патента на полезную модель; 15 статей в научных изданиях, включенных в перечень ВАК ЛНР, в том числе 2 статьи в научных изданиях, включенных в

международные наукометрические базы (Scopus); 4 статьи в журналах, входящих в РИНЦ; 5 публикаций в материалах международных научных конференций.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы из 335 источников и приложений. Работа содержит 108 рисунков и 22 таблицы, изложена на 329 страницах, из которых 260 страниц составляют основное содержание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы. Отражены основные положения, выносимые на защиту.

Раздел 1 «Современное состояние вопроса» содержит 3 подраздела. В подразделе **1.1 «Энергетические процессы в многоэлектродных печных агрегатах»** проводится анализ современного состояния проблемы повышения энергоэффективности и интенсификации теплопереноса в высокоомощных печных агрегатах для проведения различных плавильных и восстановительных процессов при производстве стали и сплавов.

На основании проведенного анализа особенностей строения рабочего пространства печных агрегатов и структуры их энергетического баланса показано, что основным источником теплогенерации является поступление теплоты от электрических дуг, а мощность джоулева нагрева может существенно изменяться в зависимости от характеристик компонентов выплавляемых сплавов и режимов погружения электродов. При этом для мощных дуговых агрегатов КПД не превышает 70 % за счет достаточно больших тепловых и электрических потерь. Кроме того, коэффициенты мощности печных агрегатов промышленной частоты в ряде случаев не превосходят 0,65-0,75, что приводит к повышенному потреблению реактивной мощности (~1МВАр/МВт).

Рассмотрены основные факторы, определяющие процессы движения расплава в печных агрегатах. Показано, что структура и интенсивность ЭВТ во многом определяются способом расположения электродов. С учетом анализа результатов последних исследований проанализирована гидродинамическая структура в расплаве традиционных трехэлектродных печных агрегатов. Показано, что без применения внешних средств перемешивания в областях между электродами и в нижней части ванны образуются застойные зоны, объем которых может достигать 15 % и более от объема ванны расплава [14]. Анализ показал, что отсутствие подовых электродов и, соответственно, электромагнитных сил в нижней части расплава препятствует

формированию интенсивных восходящих потоков и, как следствие, интенсивных вихревых структур [16].

Для характерных схем расположения сводовых и подовых электродов разобраны особенности протекания ЭВТ и конвективного теплопереноса.

В подразделе 1.2 «Принципы интенсификации теплопереноса с учетом схем энергоподвода» рассмотрены основные факторы управления ЭВТ, наиболее перспективным из которых является воздействие на расплав низкочастотных пульсаций электромагнитных сил. С учетом разработанной автором классификации многоэлектродных печных агрегатов показана перспективность применения способов расположения электродов, обеспечивающих смещение осей подовых электродов относительно соответствующих осей сводовых электродов.

В подразделе 1.3 «Методы математического моделирования при исследовании магнитогидродинамических процессов в многоэлектродных агрегатах» представлены необходимые сведения вычислительной математики в рамках МГД-задачи. Показано, что в большинстве моделей многоэлектродных печных агрегатов не учитываются или учитываются упрощенно режимы горения электрических дуг.

Для повышения энергоэффективности многоэлектродных печных агрегатов сформулированы задачи исследований, приведенные в разделе «Общая характеристика работы».

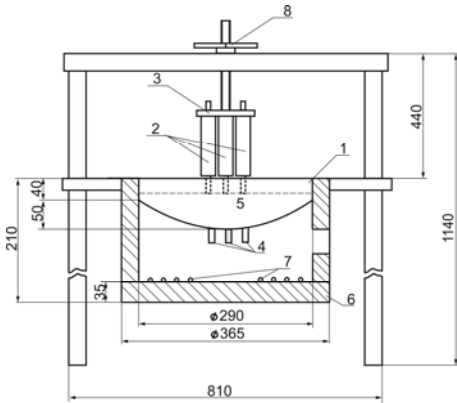
Раздел 2 «Экспериментальная установка для исследования энергетических процессов в многоэлектродных агрегатах» состоит из 5 подразделов. В подразделе 2.1 «Гидродинамическое и тепловое подобие» рассмотрены положения теории подобия применительно к исследованиям токопроводящих расплавов, проанализированы значения основных критериев, позволяющих судить о характере процессов в ваннах высокоомощных промышленных дуговых агрегатов:

- критерий Рейнольдса $Re \approx 10^4 - 10^5$, т.е. движение расплава – турбулентное;

- критерий Ричардсона $Ri \approx 1 - 10$, т.е. существенное влияние на гидродинамику и теплообмен будет оказывать тепловая конвекция;

- критерий Гартмана $Ha \approx 10^2 \div 10^3$, т.е. магнитное поле оказывает существенное влияние на движение расплава.

В подразделах 2.2 «Выбор параметров экспериментальной установки» и 2.3 «Описание экспериментальной установки» рассчитаны параметры и представлено описание конструкции многоэлектродной установки, изготовленной автором с соблюдением геометрического подобия относительно 180-тонной промышленной дуговой сталеплавильной печи [9]. Кроме трех сводовых электродов установка содержит дополнительные три подовых электрода (рисунок 1).



- 1 – плавильная ванна; 2 – сводовые электроды; 3 – изоляционная плита;
4 – подовые электроды; 5 – слой расплава; 6 – тепловая изоляция;
7 – теплоэлектронагреватели (ТЭН); 8 – система перемещения электродов

Рисунок 1 – Экспериментальная многоэлектродная установка

В качестве модельной жидкости использовался расплав свинца. Для обеспечения турбулентного режима течений расплава установлен масштаб геометрического подобия 1:22. Основные режимные параметры установки: $I_0=300$ А, $T=700-800$ К, $Re \approx 10^4$, $Pr \approx 0,026$. Разработанная установка обладает

достаточно широким уровнем вариации конструктивных параметров: глубина погружения электродов – 0-60 мм, угол поворота осей сводовых электродов $\pm 30^\circ$, диаметр расплава подовых электродов 54, 114 мм. Одной из основных целей экспериментальных исследований, проводимых на данной установке, является верификация предлагаемых математических моделей. Для электропитания установки (рисунок 2) применялся сварочный трансформатор ТД-500 (Т)

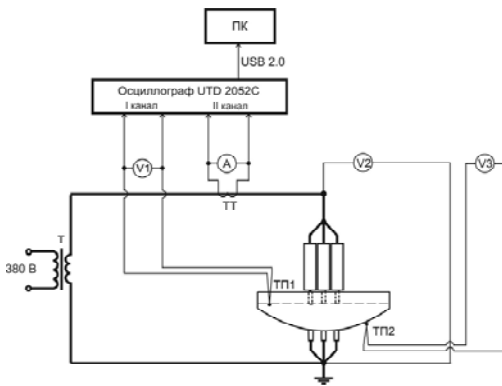


Рисунок 2 – Схема электропитания экспериментальной установки и подключения измерительного оборудования

мощностью 30 кВА с модернизированной вторичной обмоткой.

В подразделе 2.4 «Методика проведения экспериментальных исследований» приведена методика измерений энергетических параметров, с описанием методов обработки результатов. Для измерения значений температурного поля в расплаве и в донной части установки использовались предварительно проградуированные хромель-алюмелевые термопары марки ТР-01 (ТП1, ТП2). Измерение энергетических параметров проводилось с использованием электроизмерительных приборов: ампервольтметров М2020 (V1, V3), трансформатора тока лабораторного И56М (ТТ), амперметра переменного тока Д553 (А), вольтметра переменного тока Э59 (V2). Исследование полей скорости осуществлялось методом визуального наблюдения. Для компенсации температуры холодного спая термопар при измерениях свободные концы термопарных проводов размещались в стеклянных пробирках с трансформаторным маслом, помещаемых в сосудах Дюара, заполненных льдом. При измерениях обеспечивалась возможность передачи измеряемых сигналов на персональный компьютер (ПК) через цифровой запоминающий осциллограф UTD2102CE [9].

Подраздел 2.5 «Оценка неопределенностей измерений» посвящен расчетам неопределенности измерения энергетических параметров, при этом для температуры максимальная неопределенность измерения не превышает 8 %.

Раздел 3 «Математическая модель тепловых и магнитогидродинамических процессов в многоэлектродных агрегатах» состоит из 11 подразделов. В подразделе 3.1 «Метод интенсификации теплопереноса при использовании предлагаемых вариантов подвода энергии и расположения электродов»

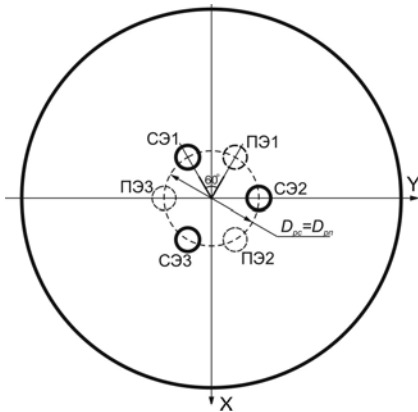


Рисунок 3 – Схема расположения сводовых и подовых электродов

приведены теоретические основы повышения энергоэффективности мощных многоэлектродных печных агрегатов. Предложен метод интенсификации теплопереноса в промышленных агрегатах, основанный на следующих положениях. Для печных агрегатов с круглой ванной предлагается способ расположения электродов, при котором три подовых и три сводовых электрода располагаются в ванне печи по вершинам равносторонних треугольников, причем угол между

осями смежных сводовых и подовых электродов составляет 60° (рисунок 3) [13, 16].

Для питания печных агрегатов предложено использовать преобразователи, которые обеспечивают питание как постоянным, так и переменным напряжением с регулируемыми параметрами амплитуды, формы, фазы и частоты (рисунок 4), диапазон частот выходного напряжения 0,01-10 Гц.

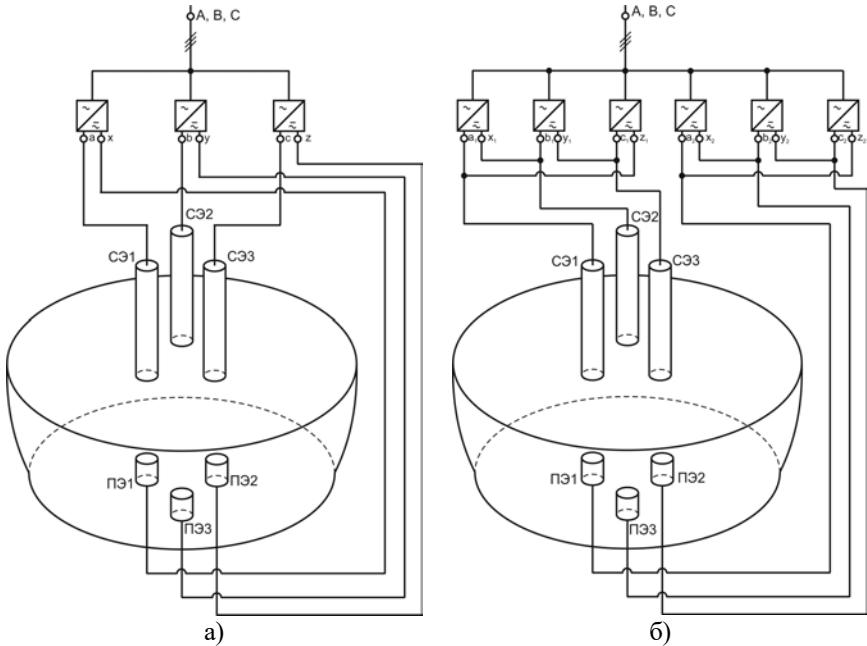


Рисунок 4 – Шестиэлектродный агрегат:

- а) – одноконтурная схема с пофазным подключением электродов;
- б) – двухконтурная схема с отдельным подключением электродов

Как будет показано далее, предложенные технические решения обеспечивают формирование дополнительных источников электромагнитных сил в центрах застойных зон и дополнительных вертикальных и горизонтальных вихревых контуров циркуляции расплава для усиления конвективных течений, формирование пульсаций электромагнитных сил с частотой, близкой к частотам вращения вихревых структур для увеличения степени турбулизации расплава, изменение электромагнитных воздействий в процессе плавки для управления конвективными течениями с возможностью периодического перестроения потоков циркуляции расплава, улучшение равномерности распределения джоулева нагрева в токопроводящих системах и в расплаве за

счет рационального расположения электродов, подавления скин-эффекта и эффекта близости.

Проработаны два варианта энергопитания печных агрегатов [13, 16]. Первый вариант подвода энергии (рисунок 4а) основан на пофазном подключении преобразователей электроэнергии к электродам печи [16], а второй (рисунок 4б) – на раздельном подключении преобразователей электроэнергии к сводовым и подовым электродам [13]. Причем во втором варианте реализуется двухконтурная схема энергопитания, которая за счет возможного независимого управления амплитудой, фазой и частотой по каждому электроду, позволяет расширить способы управления тепловыми потоками в печных агрегатах в процессе плавки.

В подразделе 3.2 «Общие положения и допущения при разработке математической модели» обоснованы следующие допущения [7, 8, 14, 17]:

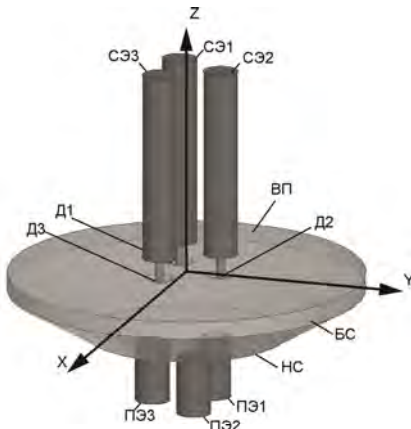


Рисунок 5 – Геометрическая модель промышленного многоэлектродного агрегата

не учитывались химические реакции, процессы испарения и плавления. Так как магнитное число Рейнольдса $Re_m < 1$ [24], то перенос магнитного поля потоком электропроводной жидкости не учитывался. Так как для течения расплава критерий Бринкмана $Br \ll 1$, то не учитывалась диссипация энергии вязкими силами. С учетом того, что электрические дуги образуют на поверхности расплава вогнутый мениск и с учетом постоянного перемещения катодно-анодных пятен дуги по поверхности мениска, распределение плотности теплового потока от дуги на этой поверхности принималось как постоянное. Дополнительные источники тепла, например, топливно-кислородные горелки, а также тепловые процессы в шлаке и в футеровке ванны агрегата не учитывались.

Подраздел 3.3 «Геометрические параметры модели» посвящен расчету геометрических размеров и параметров модели промышленного шестиелектродного агрегата (рисунок 5).

Подраздел 3.4 «Математическая модель тепловых и магнитогидродинамических процессов в жидких средах многоэлектродных агрегатов» посвящен математической постановке задачи. С учетом особенностей физических процессов, их временных и пространственных параметров, а также особенностей используемого программного обеспечения математиче-

ское моделирование физических процессов в печном агрегате осуществлялось на основе принципа декомпозиции.

В рамках МГД и тепловой подзадачи используемая модель включала уравнение сохранения энергии, уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнение состояния [11, 12, 14]:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -\rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla T) + \lambda_{эф} \nabla^2 T + Q_{дж}, \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \eta_{эф} \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} + \vec{F}_л, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (3)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \Delta T), \quad (4)$$

где ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); $Q_{дж}$ – плотность джоулеа тепловыделения, Вт/м³; p – давление, Па; $\vec{F}_л$ – плотность силы Лоренца, Н/м³; ρ_0 – плотность расплава при температуре T_0 , кг/м³; β – коэффициент объёмного расширения, К⁻¹; ΔT – отклонение температуры от T_0 , К. Входящий в уравнения (1) эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ представлялся в виде суммы коэффициента молекулярной теплопроводности и дополнительного коэффициента, обусловленного турбулентным режимом движения среды: $\lambda_{эф} = \lambda + \lambda_T$. Входящий в уравнение (2) эффективный коэффициент динамической вязкости представлялся аналогично: $\eta_{эф} = \eta + \eta_T$.

При построении модели использовались следующие граничные условия. На поверхности менисков (области Д1, Д2, Д3 на рисунке 5) задавалось условие второго рода в виде теплового потока от анодной области дуги q_a , Вт/м². На верхней поверхности (ВП) расплава, покрытого слоем шлака, использовалось условие теплоизолированности. В случае, когда верхняя поверхность расплава является свободной, применялось условие третьего рода с учетом теплоотдачи за счет конвекции и излучения. На нижней (НС) и боковой (БС) стенках печного агрегата задавалось граничное условие первого рода в виде средней температуры стенки T_{cm} , принятой по результатам экспериментальных данных. Кроме того, на всех внешних границах расплава задавалось условие прилипания. Математическое описание данных граничных условий имеет вид:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \hat{n}} \Big|_{Д1-Д3} = q_a, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial \hat{n}} \Big|_{ВПилл} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial \hat{n}} \Big|_{ВПсв} = \alpha_{\Sigma} (T - T_{окр}),$$

$$T \Big|_{HC} = T_{cm}, \quad T \Big|_{HC} = T_{cm}, \quad \vec{v} \Big|_c = 0.$$

где α_{Σ} – суммарный коэффициент теплопередачи конвекцией и излучением, Вт/м²; $T_{окр}$ – температура окружающей среды, К.

В подразделе **3.5 «Математическая модель для определения джоулева нагрева и электромагнитных сил»** приведено решение электромагнитной подзадачи. Использовалась система уравнений электромагнитного поля Максвелла, дополненная законом Ома, уравнением среды и уравнением непрерывности электрического тока [7, 8, 22]. Плотности джоулева нагрева и сил Лоренца в расплаве, входящие соответственно в уравнения (1) и (2), определялись по выражениям:

$$Q_{дж} = |\vec{J}|^2 \sigma^{-1}, \quad \vec{F}_l = \vec{J} \times \vec{B}, \quad (5)$$

где \vec{J} – плотность тока, А/м²; \vec{B} – индукция магнитного поля, Тл; σ – электропроводность среды, См/м.

Для численного решения электромагнитной задачи уравнения электромагнитного поля были выражены через векторный электрический потенциал \vec{A}_3 и магнитный скалярный потенциал Ω_m : $\vec{J} = \nabla \times \vec{A}_3$, $\vec{H} = \vec{A}_3 - \nabla \Omega_m$ – в проводящей области; $\vec{H} = -\nabla \Omega_m$ – в непроводящей области, где \vec{H} – напряженность магнитного поля, А/м; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Тогда система уравнений электромагнитного поля в потенциальной формулировке запишется в виде:

$$\nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times \vec{A}_3 - \nabla \frac{1}{\sigma} \nabla \cdot \vec{A}_3 + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A}_3 - \nabla \Omega_m) = 0, \quad \text{в проводящей области,} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mu_0 (\vec{A}_3 - \nabla \Omega_m) = 0, \quad \text{в проводящей области,} \quad (7)$$

$$-\nabla \cdot \mu_0 \nabla \Omega_m = 0, \quad \text{в непроводящей области.} \quad (8)$$

Используемые граничные условия электромагнитного поля в полной формулировке представлены нами в [7, 8]. В качестве особых граничных условий использованы значения полных токов I на входных и выходных сечениях электродов СЭ1-СЭ3 и ПЭ1-ПЭ3 (рисунок 5). В [7, 8, 22] приве-

дены результаты электромагнитных расчетов для печных агрегатов с различными конструктивными особенностями.

В подразделе 3.6 «Базовые уравнения в цилиндрической системе координат» приведены основные уравнения в указанной системе координат.

В подразделе 3.7 «Математическая модель для расчета теплофизических параметров электрических дуг» использовалось уравнение Эленбааса-Геллера с учетом переноса энтальпии и излучения. С использованием

функции $S = \int_0^T \lambda dT$ данное уравнение имеет вид [6]:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} + \sigma(S)E^2 - Q_u(S) = G \frac{\bar{h} - h_c}{L_0 \pi R_0^2}, \quad (9)$$

где Q_u – мощность радиационных энергопотерь единицы объема Вт/м³;

$G = 2\pi \int_0^R v_z \rho dr$ – расход газа в дуге, м³/с; h_c – энтальпия газа на внешней

границе дуги, Дж/кг; $\bar{h} = \frac{1}{G} 2\pi \int_0^R v_z \rho h dr$ – среднemasсовая энтальпия газа,

Дж/кг; L_0 – длина дуги, м; R_0 – радиус дуги, м. Уравнение (9) дополнялось граничными условиями в центре разрядной области (условие симметрии) и на внешней границе (условие первого рода). При расчетах использованы термодинамические характеристики воздушной плазмы при атмосферном давлении в диапазоне температур 1-25 кК [6]. Плотность общего теплового потока от анодной области электрической дуги на расплав q_a вычислялась как сумма составляющих теплового потока за счет конвекции $q_{кон}$, излучения q_u , а также за счет работы выхода электронов и анодного падения напряжения q_n :

$$q_a = q_{кон} + q_u + q_n = \frac{G(\bar{h} - h_c)}{\pi R_a^2} + \frac{1}{R_a} \int_0^R Q_u(S) r dr + J_a (U_a + A_{вых}), \quad (10)$$

где R_a – радиус анодной области дуги, м; J_a , U_a – соответственно плотность тока в анодной области дуги, А/м² и анодное напряжение падения, В; $A_{вых}$ – работа выхода электронов, э·В.

В подразделе 3.8 «Формулировка граничных условий при переменных электромагнитных полях» приведены результаты модификации гра-

нических условий для тока I и плотности теплового потока q_a , необходимые для моделирования предложенного печного агрегата при питании его трехфазным синусоидальным током различной частоты f (таблица 1). В таблице 1: $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с; τ_δ – постоянная времени дуги, с.

Таблица 1 – Модификация граничных условий для токов и тепловых потоков при трехфазном синусоидальном энергопитании

Наименование поверхности (рисунок 5)	Накладываемые граничные условия
СЭ1	$I_{c1}(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t)$
СЭ2	$I_{c2}(t) = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$
СЭ3	$I_{c3}(t) = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$
Д1	$q_{a1}(t) = q_a \left[1 - \frac{\cos(2\omega t) + \omega\tau_\delta \cdot \sin(2\omega t)}{1 + (\omega\tau_\delta)^2} \right]$
Д2	$q_{a2}(t) = q_a \left[1 - \frac{\cos\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \omega\tau_\delta \cdot \sin\left(2\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)}{1 + (\omega\tau_\delta)^2} \right]$
Д3	$q_{a3}(t) = q_a \left[1 - \frac{\cos\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \omega\tau_\delta \cdot \sin\left(2\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{1 + (\omega\tau_\delta)^2} \right]$
ПЭ1	$I_{n1}(t) = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$
ПЭ2	$I_{n2}(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t)$
ПЭ3	$I_{n3}(t) = \sqrt{2}I \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$

В подразделе 3.9 «Особенности моделирования теплофизических процессов при затвердевании расплавов» на основании квазиравновесной теории двухфазной зоны В.Т. Борисова приведены модифицированные

уравнения движения, теплопереноса, массопереноса и неразрывности [15, 23]. Разработанные модели затвердевания расплавов могут также использоваться для исследования агрегатов для электрошлакового переплава.

Подраздел **3.10 «Особенности моделирования процессов теплопереноса в экспериментальной печной установке»** посвящен построению модели экспериментальной установки, показанной на рисунке 1.

В подразделе **3.11 «Особенности численной реализации модели в пакете Ansys»** разработан алгоритм использования программных модулей с учетом передачи плотности сил Лоренца, джоулева нагрева и теплового потока от электрических дуг в пакет гидродинамических расчетов Fluent.

Раздел 4 «Выбор модели турбулентности для расчета магнитогидродинамических процессов в металлургических агрегатах» состоит из трех подразделов. В подразделе **4.1 «Основные характеристики турбулентных течений расплава»** на основании анализа результатов исследований турбулентных течений в металлургических агрегатах показано, что пульсации скорости расплава наиболее интенсивно выражены в центральной области ванны и существенно зависят от величины тока и скорости его нарастания, а показатели турбулентной кинетической энергии и турбулентной теплопроводности во многом определяют эффективность теплопереноса в расплаве.

В подразделе **4.2 «Уравнения Рейнольдса осредненного турбулентного движения»** рассматривается методика построения уравнений движения и энергии в рамках RANS-методологии (Reynolds-averaged Navier-Stokes methodology).

В подразделе **4.3 «Выбор и обоснование модели турбулентности»** на основании анализа методов моделирования турбулентных течений для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений движения была принята стандартная $k-\varepsilon$ модель, что в большей степени обусловлено хорошим совпадением величин расчетных скоростей с экспериментальными данными для различных металлургических установок. Принятые уравнения стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности в векторной форме имеют вид [11, 14]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (12)$$

где G_k – специфическая генерация турбулентной кинетической энергии, образованная от средних градиентов скорости; G_b – специфическая генерация

турбулентной кинетической энергии, образованная от выталкивающей силы. В обобщенной форме: $G_k = -\overline{\rho v_i' v_j'} \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$, $G_b = \beta g_i \frac{\eta_T}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial x_i}$, где Pr_T – турбулентное число Прандтля для энергии; $C_{3\varepsilon}$ – константа, зависящая от степени воздействия выталкивающей силы. Остальные эмпирические константы $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε , σ_k определены по данным работ Сполдинга–Лаундера. Использование уравнений (11) и (12) позволяет определить турбулентную вязкость и турбулентную теплопроводность по выражениям: $\eta_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, $\lambda_T = C_p \eta_T / Pr_T$, что дает возможность оценить влияние турбулентного движения жидкости на интенсивность теплопереноса [11, 18].

Для верификации разработанной модели гидродинамических процессов в токопроводящих расплавах с учетом k – ε модели турбулентности были сопоставлены результаты расчета и экспериментальные данные, полученные на лабораторных установках с осесимметричными электродами, установленными в Объединенном институте высоких температур РАН и в Масчусетском технологическом институте. Отмечено удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов расчета скорости с данными экспериментов в основной области потока, при этом максимальное расхождение этих значений не превышает 13–17 % [14].

Раздел 5 «Результаты исследований магнитогидродинамических и тепловых процессов в многоэлектродных агрегатах» состоит из 4 подразделов. В подразделе 5.1 «Результаты экспериментальных исследований на лабораторной установке. Адекватность разработанной математической модели» проведена дополнительная верификация моделей путем сравнения результатов расчета скорости и температуры с экспериментальными данными, полученными на разработанной автором экспериментальной многоэлектродной установке. Показано, что среднее расхождение экспериментальных и расчетных значений скорости не превышает 15 %, а среднее расхождение экспериментальных и расчетных значений температуры не превышает 4 %, что в рассматриваемых условиях является удовлетворительным [14].

В подразделе 5.2 «Общие положения и исходные данные для моделирования промышленного печного агрегата» в качестве объекта исследования принят дуговой сталеплавильный печной агрегат с ванной расплава емкостью $M=180$ т ($V=26,3$ м³) и установленной мощностью 150 МВА. Основные геометрические размеры печного агрегата: диаметр ванны $D_6=6350$ мм, высота ванны $H_6=1370$ мм, диаметр электродов $D_3=610$ мм, высота $H_3=3300$ мм, базовый диаметр распада электродов $D_{p,6}=1250$ мм, отношение $D_{p,6}/D_6 \approx 0,2$. На основании полученных выражений для условий горения дуг при действующих значениях тока 80 кА определены диаметр и

глубина менисков $D_m=500$ мм, $H_m=70$ мм, а также плотность теплового потока на расплав $q_a=6,43 \cdot 10^7$ Вт/м². При дальнейших расчетах использовались физические свойства расплава стали [10-12, 17, 18].

В подразделе 5.3 «Результаты моделирования промышленного печного агрегата при питании постоянным током» получены и проанализированы графики распределения параметров электромагнитного, гидродинамического и теплового полей в ванне расплава при принятых условиях моделирования. На рисунке 6 приведены графики распределения скорости течения расплава в основных сечениях ванны.

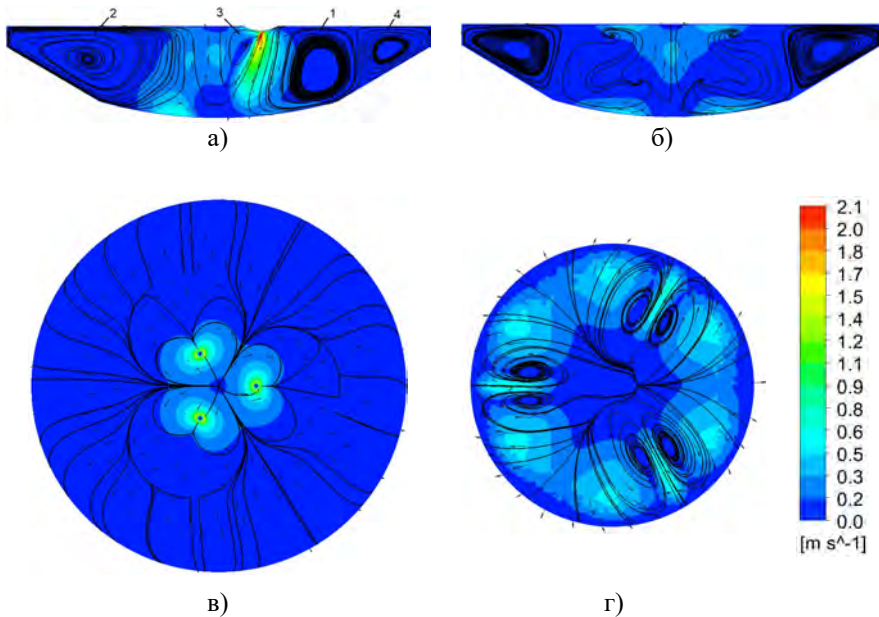


Рисунок 6 – Распределение скорости в вертикальных и горизонтальных сечениях ванны при $D_{p,с}/D_{с} \approx 0,2$: а)– вдоль оси Y; б)– вдоль оси X; в)– при $Z=-70$ мм; г)– при $Z=-1320$ мм

Показано, что в рабочем пространстве печного агрегата возникает многовихревая структура течений. Основные контуры циркуляции расплава формируются в области электрических дуг и подовых электродов, причем в области электрических дуг течение расплава нисходящее (вихри 1 и 3), а в области подовых электродов восходящее (вихрь 2). Зоны с максимальными значениями скоростей порядка 2 м/с, формируются под электрическими дугами. Средняя скорость циркуляции расплава в ванне – около 0,1 м/с.

Кроме того, в областях электрических дуг и подовых электродов формируются азимутальные течения, каждое из которых состоит из трех пар вихрей, что обусловлено особым распределением азимутальных электромагнитных сил [17]. Установлено приближенное подобие графиков распределения соответствующих проекций скорости и электромагнитных сил по форме графиков и совпадению координат их экстремумов, особенно в областях электрических дуг и подовых электродов [10].

Результаты моделирования распределения температуры в вертикальных и горизонтальных сечениях ванны приведены на рисунке 7.

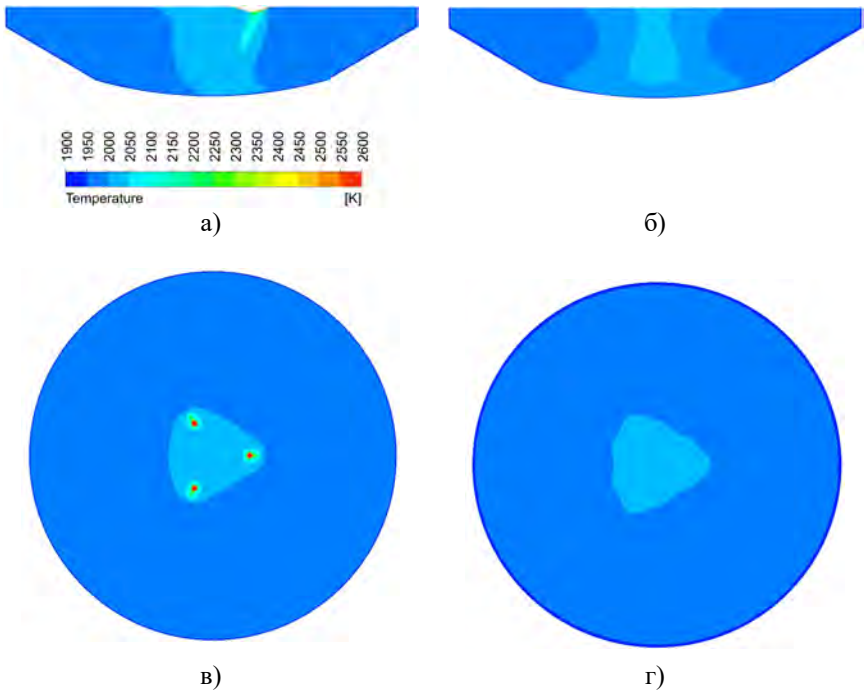


Рисунок 7 – Распределение температуры в вертикальных и горизонтальных сечениях ванны при $D_{p,\delta}/D_{\epsilon} \approx 0,2$: а) – вдоль оси Y ; б) – вдоль оси X ; в) – при $Z = -70$ мм; г) – при $Z = -715$ мм

Показано, что в большей части объема расплава интервал температур составляет от 2100 К до 1950 К. Максимальные температуры формируются под электрическими дугами. Отчетливо наблюдается вынос температуры струй перегретого расплава от электрической дуги вглубь ванны. Далее тепловая энергия электрических дуг рассеивается при движении расплава

вдоль контуров циркуляции. При принятых условиях моделирования достигнуто приемлемое распределение теплового поля в расплаве при коэффициенте вариации температуры, не превышающем 6 %. В среднем по глубине сечения ванны коэффициенты теплопередачи составляют порядка $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что сопоставимо с условиями пневматического перемешивания расплава [11]. Таким образом, ЭВТ являются эффективным механизмом теплопереноса от областей электрических дуг вглубь ванны.

На основании анализа полученных результатов моделирования выявлены симметричные свойства формируемых электромагнитных, гидродинамических и тепловых полей в ваннах предлагаемых печных агрегатов при питании его постоянным током, способствующие повышению равномерности распределения температуры в объеме расплава, а именно: в горизонтальных сечениях ванны – относительно линий, проходящих через ось ванны и оси электрических дуг; в вертикальном сечении, проходящем через ось X – относительно оси ванны. Кроме того, наблюдается практически центральная симметрия поля джоулева нагрева в среднем по глубине горизонтальном сечении ванны при $D_p/D_6 < 0,25$ (рисунок 8 б) [8].

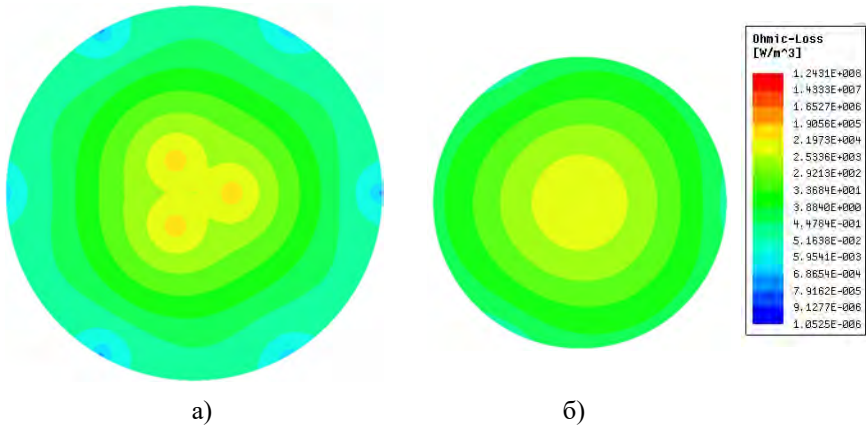


Рисунок 8 – Распределение плотности джоулева нагрева в горизонтальных сечениях ванны а) – при $Z = -70 \text{ мм}$; б) – при $Z = -715 \text{ мм}$

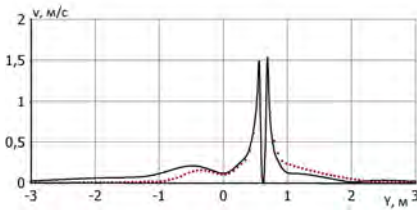
На основании численных расчетов выявлено влияние тепловой (свободной) конвекции на структуру течений в ванне расплава. С учетом составленной схемы взаимодействия электровихревой и тепловой конвекции (рисунок 9) установлено, что в областях электрических дуг электровихревые и свободно-конвективные течения являются противоположенными, что приводит к некоторому ослаблению нисходящего электровихревого течения в этих областях. В области подовых электродов направления элек-



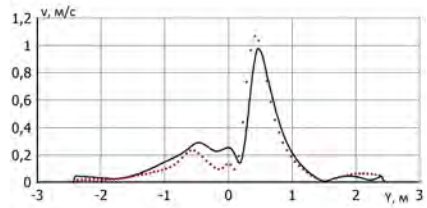
Рисунок 9 – Схема взаимодействия электровихревой и тепловой конвекции

Рисунок 9 – Схема взаимодействия электровихревой и тепловой конвекции

Рисунок 10 – Распределение скорости вдоль оси Y . На графиках сплошной линией показано распределение скорости с учетом тепловой конвекции, а точечным пунктиром – без учета тепловой конвекции.



а)



б)

Рисунок 10 – Распределение скорости вдоль оси Y :

а) – $Z=-70$ мм; б) – $Z=-715$ мм ($D_{p,\delta}/D_{\delta}\approx 0,2$)

С использованием вычислений локального числа Ричардсона

($Ri = Gr / Re^2$) выявлено (рисунок 11), что при соотношении $D_{p,\delta}/D_{\delta} < 0,25$

в центре ванны доминирует электровихревая конвекция (значения чисел $Ri \approx 1$), а вблизи боковых стенок – тепловая ($Ri > 2$), что и приводит к формированию вихревых структур вблизи боковых стенок печи, движение которых на поверхности расплава направлено к периферии ванны (см. рисунок 6 а, б) [12, 17]. На основании дальнейшего сравнения результатов выявлено, что влияние тепловой конвекции за счет противодействия свободно-конвективных и электровихревых течений и уменьшения скорости нисходящих потоков от областей электри-

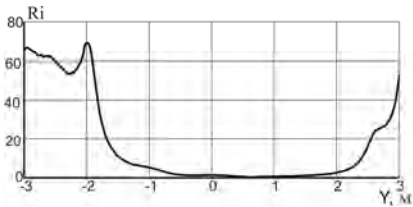


Рисунок 11 – Распределение локального числа Ричардсона вдоль оси Y при $Z=-75$ мм ($D_{p,\delta}/D_{\delta}\approx 0,2$)

ческой за счет противодействия свободно-конвективных и электровихревых течений и уменьшения скорости нисходящих потоков от областей электри-

ческих дуг приводит к следующему: среднеинтегральные значения чисел Нуссельта в среднем по глубине горизонтальном сечении ванны уменьшаются на 18 %, средние по объему значения эффективной теплопроводности уменьшаются на 11 %, средняя по объему температура повышается на 11 К [12, 17].

Также в объеме подраздела выявлено влияние отношения D_p/D_6 на параметры конвективного теплопереноса. Для оценки интегральных показателей в качестве основных геометрических сечений ванны было выбрано горизонтальное сечение 1, располагаемое в средней по глубине части ванны и вертикальное сечение 2, проходящие через ось X . Выбор данных сечений проводился из соображений, что через сечение 1 проходит тепловой поток от электрических дуг к подине печи, а через сечение 2 тепловой поток передается от первого и третьего контуров циркуляции расплава ко второму (рисунок 6 а). Получены зависимости средних значений скоростей в сечениях, объема застойных зон, чисел Нуссельта и эффективной теплопроводности от данного конструктивного параметра (рисунок 12) [18]. На графиках зависимостей полученные данные приведены к базовым показателям, т.е. полученным по результатам моделирования при базовом варианте расположения электродов ($D_{p,6}/D_6 \approx 0,2$).

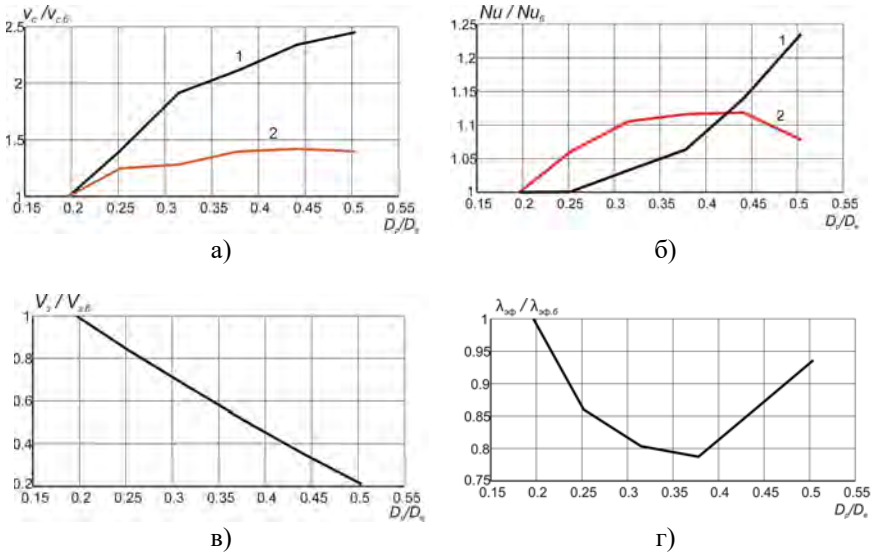


Рисунок 12 – Зависимости относительных величин средних значений скоростей (а) и числа Нуссельта (б) в сечениях 1 и 2, объема застойных зон (в) и средней по объему эффективной теплопроводности (г) от отношения D_p/D_6

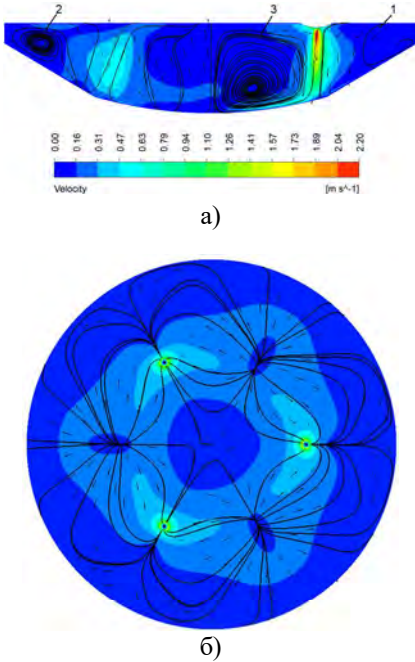


Рисунок 13 – Распределение скорости в вертикальном сечении вдоль оси Y (а) и в горизонтальном сечении при $Z=-715$ мм (б) при $D_p/D_g \approx 0,5$

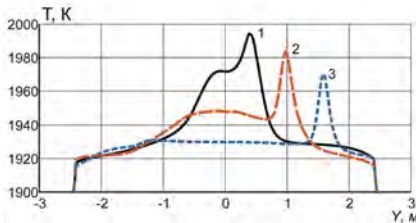


Рисунок 14 – Распределение температуры вдоль оси Y при $Z=-715$ мм; (1– при $D_p/D_g \approx 0,2$; 2– при $D_p/D_g \approx 0,3$; 3– при $D_p/D_g \approx 0,5$)

Показано, что с увеличением отношения D_p/D_g от 0,2 до 0,5 увеличивается интенсивность вертикальных вихревых течений, циркулирующих между осью соответствующей электрической дуги и осью ванны (вихрь 3), а интенсивность течений, циркулирующих между осью дуги и боковой стенкой (вихрь 1), несколько уменьшается (рисунок 13). Также при этом увеличивается интенсивность азимутальных течений, циркулирующих в горизонтальных сечениях ванны, подавляются вихревые течения, формируемые за счет тепловой конвекции вблизи боковых стенок печи. Значения средних скоростей в выбранных сечениях увеличиваются (рисунок 12 а), только при $0,44 < D_p/D_g \leq 0,5$ наблюдается некоторое уменьшение средней скорости в сечении 2 (от 1,42 до 1,39 о.е.).

В сечении 1 средняя скорость увеличивается более чем в 2 раза в сравнении со средней базовой скоростью $v_{с.б}$ в данном сечении. Увеличение средних скоростей также способствует уменьшению объема застойных зон в ванне (рисунок 12 в). С увеличением D_p/D_g интенсивность конвективного теплопереноса в сечении 1 увеличивается более чем на 20 % (рисунок 12 б). В сечении 2 при $0,2 < D_p/D_g \leq 0,44$ число Нуссельта увеличивается приблизительно на 10 %, а при $0,44 < D_p/D_g \leq 0,5$ наблюдается уменьшение числа Нуссельта на 4 %, что вызвано

уменьшением скорости в этом сечении. Показано, что с увеличением D_p/D_e значения чисел Ричардсона вблизи оси ванны увеличиваются.

Отметим, что за счет более эффективного конвективного теплопереноса при увеличении соотношения D_p/D_e температура в горизонтальных сечениях ванны распределяется более равномерно: снижаются максимумы температур в областях электрических дуг, понижается приблизительно на 20-30 К температура в центральной части ванны (рисунок 14), средняя по объему ванны температура при $D_p/D_e \approx 0,5$ на 3 К ниже, чем средняя температура в базовом варианте расположения электродов [18]. Улучшение условий теплопереноса в центральной части ванны также обусловлено увеличением средней по объему эффективной теплопроводности при $0,38 < D_p/D_e \leq 0,5$ (рисунок 12 г) за счет увеличения интенсивности турбулизации потока ($\lambda_{эф,max} \approx 1,8 \cdot 10^5$ Вт/(м·К)) и за счет перемещения в центральную область ванны зоны максимальных значений эффективной теплопроводности (рисунок 15).

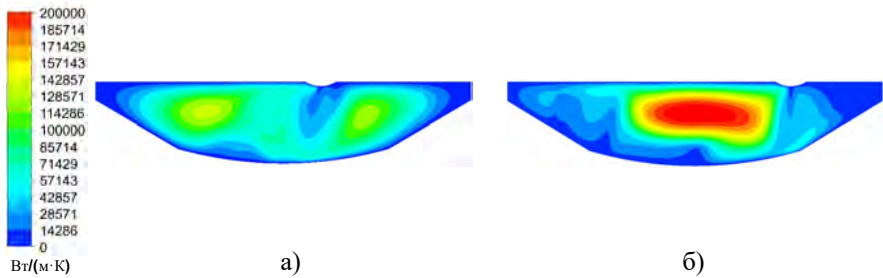


Рисунок 15 – Графики распределения эффективной теплопроводности в вертикальном сечении ванны вдоль оси Y :
а) – при $D_p/D_e \approx 0,2$; б) – при $D_p/D_e \approx 0,5$

Таким образом, полученные результаты позволяют рекомендовать для печных агрегатов, работающих без внешних теплогенерирующих устройств, рациональный диапазон значений отношения $D_p/D_e - 0,4-0,5$ [18].

В работе также установлены закономерности теплопереноса при неодинаковых значениях отношений диаметров распада сводовых и подовых электродов D_{pc}/D_e и D_{pn}/D_e . Детально исследованы процессы для двух случаев: при $D_{pc}/D_e \approx 0,2$, $D_{pn}/D_e \approx 0,3$ и при $D_{pc}/D_e \approx 0,3$, $D_{pn}/D_e \approx 0,2$. Показано, что в данных случаях интегральные показатели теплопереноса близки к аналогичным показателям при $(D_{pc}=D_{pn})/D_e \approx 0,3$.

В подразделе 5.4 «Результаты моделирования промышленного печного агрегата при питании токами пониженной частоты» рассматриваются особенности гидродинамических и тепловых процессов при питании печных агрегатов пульсирующими и синусоидальными токами пониженной частоты (до 1 Гц).

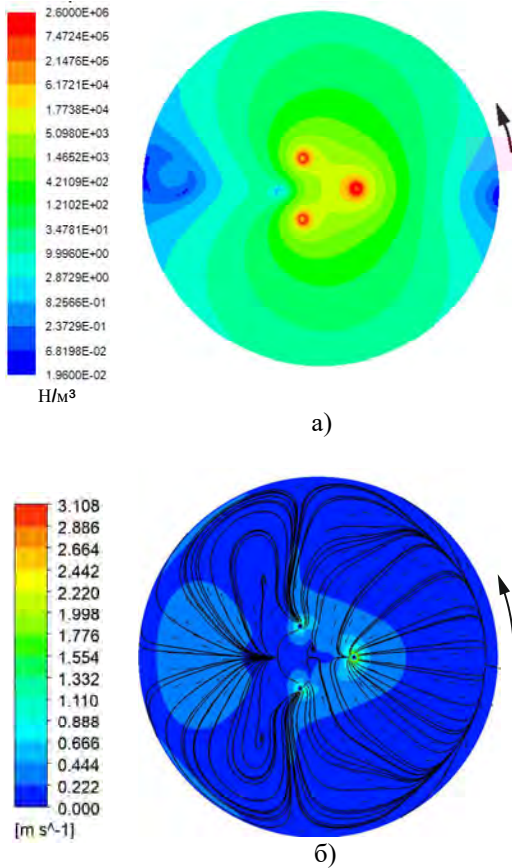


Рисунок 16 – Сопоставление графиков распределения электромагнитных сил (а) и скорости (б) вблизи поверхности расплава при питании трехфазным током частотой 0,1 Гц

формировании обратной последовательности векторов токов в электродах направление движения электромагнитного поля изменяется на противоположное.

особенности гидродинамических и тепловых процессов при питании печных агрегатов пульсирующими и синусоидальными токами пониженной частоты (до 1 Гц). На основании исследования переходных гидродинамических процессов при включении и выключении постоянного тока 80 кА показано, что время установления течений в ванне расплава составляет 2-4 с. Показано, что воздействие трехфазного переменного тока регулируемой частоты и формы на ванну расплава является более многофакторным за счет наложения на расплав амплитуд токов и формирования в горизонтальной плоскости ванны вращающегося электромагнитного поля.

На рисунке 16 приведены результаты моделирования для временного момента, соответствующего амплитуде тока через СЭ2. При прямой последовательности векторов токов в электродах поле электромагнитных сил вращается против часовой стрелки и совершает оборот вокруг оси ванны за время, соответствующее половине периода тока (рисунок 16). При форми-

При пониженной частоте тока вращение электромагнитного поля вызывает аналогичное вращение гидродинамического поля в расплаве, при этом более чем на 50 % увеличивается интенсивность азимутальных вихревых течений.

При этом амплитудные значения скорости течений и турбулентной кинетической энергии приблизительно в $\sqrt{2}$ раз больше, чем при питании постоянным током. Все вышеназванные факторы способствуют улучшению условий перемешивания расплава, при этом объем застойных зон по сравнению с вариантом энергопитания постоянным током уменьшается более чем в 2 раза. В работе обоснована возможность динамического изменения параметров вихревых структур при изменении порядка чередования фаз токов.

Раздел 6 «Практическая реализация результатов исследований» состоит из 4 подразделов. В подразделе **6.1 «Методические положения по выбору рациональных энергетических и конструктивных параметров печных агрегатов»** предложен алгоритм, описывающий совокупность процедур для расчета и анализа технологических, энергетических и конструктивных параметров с учетом основных критериев энергоэффективности для оценки результатов моделирования и проектных решений целью улучшения электромагнитных, тепловых, и технико-экономических показателей. Алгоритм включает в себя три основных этапа [13, 19].

На первом этапе анализируются основные параметры печного комплекса. Оценивается производительность печного агрегата, удельный расход электроэнергии и другие показатели технологического процесса. При анализе энергетических параметров производится оценка источников теплогенерации: количества тепла, передаваемого за счет электрической дуги и джоулева нагрева, а также других источников теплогенерации. Оцениваются тепловые потери. Для жидких сред рассчитываются основные гидродинамические критерии и критерии теплопереноса (Re , Pr , Gr , Ri , Nu). Анализируются основные параметры электрического режима печного агрегата. Определяется структура рабочего пространства печных агрегатов, оцениваются геометрические и теплоэнергетические параметры технологических зон, а также режимы горения дугового разряда и режимы вторичного энергоподвода.

На втором этапе разрабатываются основные решения по модернизации энергосиловой части и компоновке оборудования, выбирается род используемого тока: постоянный, постоянный реверсивный ток, ток пониженной частоты или их комбинация. Основное внимание уделяется выбору параметров преобразователей электроэнергии, их компоновке, а также обеспечению надежности функционирования электропечных комплексов. В рамках этапа рекомендуется проводить предварительный выбор значений час-

тоты переменного тока по частоте обращения основных вихревых структур, используя характерную скорость v_0 и геометрические параметры ванны:

$$f \approx \frac{1}{2} \frac{v_0}{L_{вихр}}, \quad L_{вихр} = \frac{\pi(H_e + D_e/4)}{2}. \quad (13)$$

Для рассматриваемых условий рекомендуемый диапазон частот – 0,01-1 Гц.

На втором этапе также производится численное моделирование физических процессов в электрической дуге, а также в ванне расплава. Рассчитываются теплофизические параметры электрических дуг. Производятся гидродинамические и тепловые и электромагнитные расчеты.

Для оценки результатов моделирования и выбора проектных решений предложено использовать основные критерии энергоэффективности, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Основные критерии энергоэффективности

Формулировка	Целевая функция
Критерий максимального приближения текущей температуры расплава к заданной температуре, минимальной мощности дугового разряда и минимальных тепловых потерь	$j_1 = T_i - T_{30} \rightarrow \min,$ $j_2 = P_0(U_n, I_n) \rightarrow \min,$ $j_3 = Q_{\Sigma m, nom} \rightarrow \min.$
Критерий минимизации времени нагрева расплава и времени температурной гомогенизации	$j_4 = \int_{t_1}^{t_2} t dt = t_z \rightarrow \min,$ $\kappa_{вар}^{\min} \leq \kappa_{вар} \leq \kappa_{вар}^{\max}$
Критерий обеспечения минимума потерь электрической энергии во вторичном энергоподводе	$j_5 = \sum_i (R_i \cdot X_{Li}) \rightarrow \min.$
Критерий минимума приведенных затрат для оценки технико-экономической эффективности электропечного комплекса	$j_6 = E_n K + C_u \rightarrow \min.$

В таблице 2: T_i, T_{30} – соответственно текущая и заданная температуры расплава, К; P_0 – мощность дугового разряда, МВт; $Q_{\Sigma m, nom}$ – суммарные тепловые потери в печном агрегате, МВт; $\kappa_{вар}^{\min}, \kappa_{вар}^{\max}$ – диапазон возможного изменения коэффициента вариации температуры расплава; где R_i, X_{Li} – соответственно активное и индуктивное сопротивление участков вторичного энергоподвода, Ом; E_n – нормативный коэффициент эффективности капита-

ловложений; K – единовременные капитальные вложения на модернизацию оборудования печного агрегата, руб; C_u – эксплуатационные затраты, руб.

На третьем этапе решается задача адаптации АСУТП, необходимая для поддержания выбранных рациональных энергетических параметров в процессе плавки. Интеграция предложенных математических моделей в структуру АСУТП позволит сформировать алгоритмы контроля и управления энергетическими и материальными потоками, что позволит в комплексе решить две задачи: идентификацию энергетического состояния процесса плавки и эффективное управление печным агрегатом в соответствии с рабочими характеристиками, определенными на предыдущем этапе. В работе предлагается дополнительно использовать следующие управляющие параметры: частоту, форму и фазу питающего напряжения, регулируемые по каждому электроду. Раздельное управление по каждому электроду позволяет симметризовать электромагнитное, а, следовательно, и тепловое поле в печном агрегате, что особенно важно при различных нарушениях технологического процесса [13].

В подразделе 6.2 «Улучшение электромагнитных и тепловых условий работы вторичного токопровода и графитированных электродов при переходе на питание напряжением пониженной частоты» показано, что при питании токами пониженной частоты порядка 1 Гц в конструктивных элементах токопроводящих систем улучшается равномерность распределения электромагнитного поля, устраняется вредное влияние эффекта близости и поверхностного эффекта. В подразделе также проведена оценка температурного поля в поперечном сечении графитированных электродов при различных частотах питающего напряжения (рисунок 17) [19].

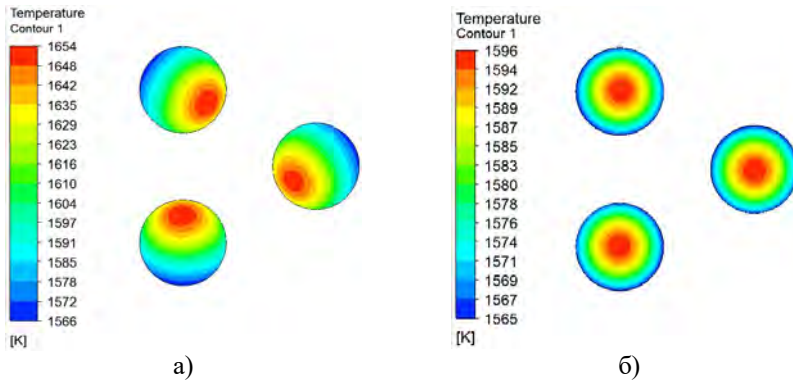


Рисунок 17 – Сравнение тепловых полей в поперечном сечении графитированных электродов: а) – при частоте тока 50 Гц; б) – при частоте тока 1 Гц

Проведенные расчеты показали, что распределение температуры в электродах при частоте 1 Гц становится более равномерным, а коэффициент вариации температуры для предлагаемого варианта составляет 0,52 %, что в 2,7 раза меньше, чем при частоте 50 Гц.

В подразделе **6.3 «Повышение надежности функционирования печных комплексов»** установлены недостатки энергетического оборудования печных агрегатов [4, 5], а также предложен комплекс решений для повышения надежности функционирования печных комплексов за счет применения специальных схем преобразователей, состоящих из резервируемых вентиляльных блоков, применения оборудования для оперативного перевода печных агрегатов на напряжение промышленной частоты, замены электромеханических коммутационных устройств регулирования напряжения на бесконтактные, а также за счет применения многообмоточных фазосдвигающих трансформаторов для снижения высших гармоник в спектрах токов и напряжений [1-3, 5, 20]. На предложенные технические решения получены патенты [25-26].

В подразделе **6.4 «Технико-экономическая оценка предложенных методов повышения энергоэффективности и интенсификации теплопереноса в многоэлектродных агрегатах»** представлена оценка времени температурной гомогенизации расплава в различных металлургических установках. При этом удельная мощность перемешивания расплава определялась с учетом специфической генерации турбулентной кинетической энергии:

$$P_{nep} = \frac{1}{M_V} \int (G_k + G_b) dV .$$

Для оценки времени температурной гомогенизации использовано эмпирическое выражение, отражающее связь между геометрическими размерами ванны и мощностью перемешивания:

$$t_z = 100 \left(\frac{D_e^2}{H_e} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{P_{nep}} \right)^{\frac{1}{3}} . \quad (14)$$

Показано, что результаты расчетов по выражению (14) в достаточной степени (с погрешностью не более 15 %) коррелируют с теоретическими и экспериментальными данными, полученными как для лабораторных, так и для промышленных установок.

На основе выражения (14) произведено сравнение показателей базового варианта, т.е. трехэлектродного печного агрегата ДСП-180 при его питании током промышленной частоты и предлагаемого варианта, т.е. шестиэлектродного печного агрегата при его питании переменным током пониженной

частоты. Показано, что для предлагаемого варианта величина $P_{пер}$ увеличивается более чем в 7 раз за счет интенсификации ЭВТ [19].

Для оценки степени улучшения энергетических показателей печных комплексов рассчитаны рабочие характеристики печного агрегата, показанные на рисунке 18. Расчеты проведены по методике [5]. На рисунке 18: P – активная мощность печного агрегата; Q – реактивная мощность; $\cos\phi$ – коэффициент мощности; $P_{пол}$ – полезная мощность; η_s – электрический КПД; индексом «б» отмечены показатели базового варианта, а индексом «п» – предлагаемого варианта.

Анализируя характеристики на рисунке 18, установлено, что предлагаемые металлургические комплексы позволяют при рабочем токе печного агрегата повысить более чем на 10 % коэффициент мощности и, соответственно, полезную мощность агрегата, снизить более чем на 40 % потребляемую реактивную мощность, повысить КПД агрегата приблизительно на 1 % [19].

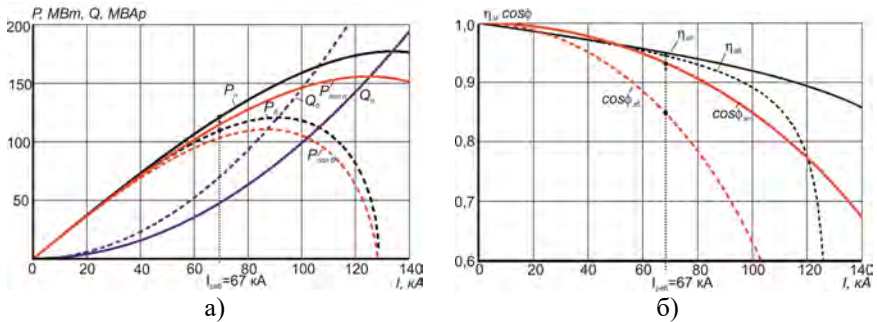


Рисунок 18 – Сравнительные рабочие характеристики предложенного печного агрегата на пониженной частоте и базового печного агрегата на промышленной частоте

Проведенные технико-экономические расчеты показали, что за счет увеличения полезной мощности агрегата и снижения времени температурной гомогенизации расплава для дуговых сталеплавильных комплексов возможно сократить время плавки на 4-6 минут, повысить производительность агрегатов на 10-12 %. Данные технико-экономические расчеты показали, что срок окупаемости капитальных вложений при модернизации действующих электрометаллургических комплексов не превышает 4 лет. Следовательно, внедрение предлагаемых вариантов многоэлектродных металлургических агрегатов можно считать экономически целесообразным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплекса исследований решена актуальная научно-техническая проблема развития научных основ повышения энергоэффективности и производительности многоэлектродных металлургических агрегатов для проведения плавильных и восстановительных процессов.

1. На основании экспериментальных и теоретических исследований подтверждена эффективность формирования многовихревой структуры вертикальных и азимутальных течений в расплаве предложенного металлургического агрегата, содержащего три сводовых и три подовых электрода, в которых угол между осями смежных сводовых и подовых электродов составляет 60° при энергопитании постоянным током и током пониженной частоты в диапазоне 0,01-0,1 Гц. При принятых условиях исследований обеспечивается максимальная скорость циркуляции расплава – порядка 2 м/с, а средняя скорость расплава в ванне – 0,1 м/с. Показано, что по сравнению с трехэлектродными печными агрегатами, работающими без средств дополнительного перемешивания, мощность перемешивания в расплаве предложенного шестиэлектродного агрегата за счет создания дополнительных каналов циркуляции расплава увеличивается более чем в 7 раз, что обеспечивает объем застойных зон не более 5 % и приемлемое распределение теплового поля при коэффициенте вариации температуры, не превышающем 6 %.

2. Обоснован рациональный диапазон значений отношения $D_p/D_\delta=0,4-0,5$, при котором обеспечивается улучшение условий перемешивания и равномерности распределения температуры в ванне расплава за счет повышения интенсивности вертикальных вихревых течений, циркулирующих между осью соответствующей электрической дуги и осью ванны, рационального распределения теплогенерирующих мощностей, а также перераспределения зон максимальных значений эффективной теплопроводности в сравнении с базовым вариантом расположения электродов при $D_p/D_\delta \approx 0,2$.

3. Обоснована возможность динамического изменения параметров вихревых структур в расплаве на основе регулирования амплитуды, частоты и порядка чередования фаз токов в сводовых и подовых электродах.

4. Разработаны и внедрены схемы и технические средства для повышения надежности функционирования электрометаллургических комплексов высокой мощности с преобразователями частоты.

5. Определены параметры электромагнитных и тепловых процессов в графитированных электродах и во вторичном токоподводе при питании агрегатов токами различной частоты. Подтверждена расчетами возможность увеличения более чем на 10% коэффициента мощности и, соответственно, полезной мощности предложенных агрегатов, а также увеличения КПД печного агрегата на 1 % при использовании предложенных вариантов энергопитания.

6. Разработаны рекомендации для эффективного проектирования многоэлектродных металлургических агрегатов с учетом научно-обоснованного выбора их рациональных энергетических и конструктивных параметров для различных промышленных условий их эксплуатации.

7. На основании технико-экономических расчетов показано, что за счет увеличения полезной мощности агрегата и снижения времени температурной гомогенизации расплава для дуговых сталеплавильных комплексов возможно сократить время плавки на 4-6 минут, уменьшить удельный расход активной электроэнергии на 1-2 %, а реактивной электроэнергии – на 25-40 %, а также повысить производительность агрегатов на 10-12 %, при этом срок окупаемости капитальных вложений при модернизации агрегатов не превышает 4 лет.

8. Результаты исследований внедрены на Стахановском заводе ферросплавов, электротехническом заводе «Вектор» (г. Воткинск, Российская Федерация), а также в учебном процессе Луганского государственного университета имени Владимира Даля.

Основные научные публикации по теме диссертационного исследования

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при МОН ЛНР для публикации основных результатов диссертационных исследований

1. Кухарев, А.Л. Разработка и испытание высоковольтного преобразователя частоты / А.Л. Кухарев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2012. – Вып. 37. – С. 297–306.

2. Кухарев, А.Л. Моделирование фазосдвигающих трансформаторов для высоковольтных преобразователей частоты каскадного типа / А.Л. Кухарев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып. 39. – С. 255-262.

3. Кухарев, А.Л. Исследование режимов работы батарей конденсаторов в системе электроснабжения ферросплавного завода / А.Л. Кухарев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2014. – Вып. 1 (42). – С. 157–163.

4. Кухарев, А.Л. Пути повышения энергоэффективности мощных электропечных установок / С.Ф. Артюх, А.Л. Кухарев // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 56 (1098). – С. 11–21.

5. Кухарев, А.Л. Гибкие системы электропитания мощных электропечных установок переменного тока / А.Л. Кухарев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2016. – № 2 (17). – С. 132-139.

6. Кухарев, А.Л. Расчет параметров электрической дуги в электропечных установках для производства стали и ферросплавов / А.Л. Кухарев, К.А. Корсунов, С.Н. Сергиенко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2017. – Вып. 5(48). – С. 52-57.

7. Кухарев, А.Л. Электромагнитные поля мощных электропечных установок / А.Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2017. – №2 (4), Ч. 1. – С. 190–194.

8. Кухарев, А.Л. Электромагнитное поле в ванне многоэлектродной печи / А.Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2018. – №5 (11), Ч. 1. – С. 247-251.

9. Кухарев, А.Л. Экспериментальная многоэлектродная установка для исследования энергетических процессов в токопроводящих расплавах / А.Л. Кухарев, В.В. Петренко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2018. – №4 (25). – С. 64–71.

10. Кухарев, А.Л. Моделирование электровихревых течений в расплаве многоэлектродной дуговой печи при ее питании постоянным током / А.Л. Кухарев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2019. – № 1 (26). – С. 37-46.

11. Кухарев, А.Л. Численное исследование процессов теплопереноса в расплаве многоэлектродной дуговой печи при учете электровихревых течений / А.Л. Кухарев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2019. – Вып. 13 (56). – С. 40-48.

12. Кухарев, А.Л. Течения расплава в многоэлектродной дуговой печи в условиях электровихревой и естественной конвекции / А.Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2019. – №7 (25). – С. 217-223.

13. Кухарев, А.Л. Методология оптимального проектирования многоэлектродных электрометаллургических комплексов / А.Л. Кухарев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. – Луганск: ЛНУ им. В. Даля, 2019. – № 2 (27). – С. 20-30.

14. Kukharev, A. The Peculiarities of Convective Heat Transfer in Melt of a Multiple-Electrode Arc Furnace / A. Kukharev, V. Bilousov, E. Bilousov, V. Bondarenko // Metals. – 2019. – № 9. – 1174. (Scopus)

15. Kukharev, A. Mathematical modeling of the supercooled steel ingot formation. Problem statement / J. Bazdyreva, V. Bilousov, F. Nedopekin, V. Bodriaha, V. Bondarenko, A. Kukharev // The European Physical Journal Special Topics. – 2020. – Vol. 229. – P. 495–500. (Scopus)

Статьи в журналах, сборниках научных трудов и материалов конференций

16. Кухарев, А.Л. Принципы повышения интенсивности тепломассообмена в жидких средах дуговых многоэлектродных печей / А.Л. Кухарев, В.В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2018. – № 2. – С. 57-67.

17. Кухарев, А.Л. Особенности конвективного теплопереноса в расплаве многоэлектродной дуговой печи / А.Л. Кухарев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново: ИГЭУ, 2020. – № 2. – С. 13-22.

18. Кухарев, А.Л. Выбор рационального расположения электродов в многоэлектродной дуговой печи постоянного тока / А.Л. Кухарев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – Иваново: ИГЭУ, 2020. – № 3. – С. 23-31.

19. Кухарев А.Л. Выбор рациональных энергетических параметров многоэлектродных электропечных установок / А.Л. Кухарев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – Донецк: ДонНУ, 2020. – № 1. – С. 59-71.

Доклады на научных конференциях и другие научные публикации

20. Кухарев, А.Л. Схемотехнические аспекты повышения надежности преобразователей частоты каскадного типа / А.Л. Кухарев // Materiały IX Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2013». – Przemysł: Nauka i studia, 2013. – Vol. 38. – P. 44-47.

21. Кухарев, А.Л. Некоторые физические особенности работы мощных электропечных установок / А.Л. Кухарев, К.А. Корсунов // Открытые физические чтения: тезисы докладов международной научно-практической конференции (20 мая 2016 г). – Луганск: ЛГУ им. Т. Шевченко, 2016. – С. 47.

22. Кухарев, А.Л. Особенности распределения электромагнитного поля в ваннах рудовосстановительных печей / А.Л. Кухарев, К.А. Корсунов, А.В. Чаленко // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук:

материалы XXIX международной научно-практической конференции 29–30 июня 2016 г. – Москва: Изд-во «Институт стратегических исследований»: Изд-во «Перо», 2016. – С. 40 – 45.

23. Кухарев, А.Л. Математическое моделирование формирования переохлажденного слитка Fe80Ba20 / Ю.А. Баздырева, В.В. Белоусов, В.И. Бондаренко, В.В. Бодряга, Ф.В. Недопекин, А.Л. Кухарев // Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии: тезисы VIII Международной конференции (11–12 апреля 2019 года). – Ижевск: Изд-во УдмФИЦ, УрО РАН, 2019. – С. 88-90.

24. Кухарев, А.Л. О некоторых критериях подобия при моделировании дуговых печей / А.Л. Кухарев // Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы V Международной научной конференции (Донецк, 17-18 ноября 2020 г.). – Том 1: Физико-математические и технические науки. Часть 2 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2020. – С. 19-22.

Патенты

25. Пат. 90505 Україна. Система електропостачання трифазної дугової печі з високовольтним багаторівневим перетворювачем частоти / заявники та патентовласники О.Л. Кухарев, Л.Б. Медовар. – № u201400372; заявл. 16.01.2014; опубл. 26.05.2014, Бюл. № 10. – 8 с.

26. Пат. 94970 Україна. Пристрій для живлення дугових печей / О.Л. Кухарев; заявник та патентовласник Українська інженерно-педагогічна академія. – № u201405967; заявл. 02.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. – 4 с.

АННОТАЦИЯ

Кухарев А.Л. Развитие научных основ повышения энергоэффективности многоэлектродных металлургических агрегатов. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.13 –Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт». – Алчевск, 2020 г.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы развития научных основ повышения энергоэффективности многоэлектродных печных агрегатах, использующихся для осуществления различных плавильных и восстановительных процессов, на основе новых теоретических представлений о процессах в токопроводящих расплавах при постоянных и пе-

ременных электромагнитных полях, формируемых с помощью многоэлектродного токоподвода.

Предложены теоретические основы, конструктивные и схемотехнические решения для повышения энергоэффективности печных агрегатов и обеспечения интенсификации теплопереноса в расплаве путем усиления МГД-эффектов на основе конструкций агрегатов, содержащих кроме трех сводовых электродов три дополнительные подовые электроды, в которых угол между осями смежных сводовых и подовых электродов составляет 60° , энергопитание которых осуществляется от специальных преобразователей электроэнергии.

На основе развития комплекса математических моделей электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в предложенном шестиэлектродном агрегате при различных режимах энергопитания выявлены закономерности формирования многовихревой структуры вертикальных и азимутальных течений в расплаве печи и конвективного теплопереноса с учетом влияния тепловой конвекции и изменения конструктивных параметров агрегата.

Достигнуто улучшение условий перемешивания расплава и температурной гомогенизации в расплаве предложенного шестиэлектродного агрегата по сравнению с трехэлектродными печными агрегатами, работающими без средств дополнительного перемешивания.

Разработаны методические положения по выбору рациональных энергетических и конструктивных параметров печных комплексов и повышению их надежности с учетом различных промышленных условий их эксплуатации. Технико-экономическими расчетами подтверждена экономическая целесообразность внедрения предложенных технических решений для экономики энергетических и материальных ресурсов.

Ключевые слова: электродный печной агрегат, режимные и конструктивные параметры, энергоэффективность

SUMMARY

Kuharev A.L. The development of the scientific foundations for improving energy efficiency in multi-electrode metallurgical unit – manuscript.

The dissertation for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences, specialty Machines, units and processes (by industry) – SEI HE LPR «Donbass state technical institute. – Alchevsk, 2020.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of developing the scientific foundations of improving energy efficiency in multi-electrode metallurgical unit used for various melting and reduction processes,

based on new theoretical concepts of processes in conductive melts with DC and AC electromagnetic fields formed using a multi-electrode current supply.

Theoretical foundations, constructive and circuit solutions are proposed to increase the energy efficiency and to enhance heat transfer in the melt by enhancing MHD effects, based on unit designs containing, in addition to three roof arc electrodes, three bottom electrodes in which the angle between the axes of adjacent roof and bottom electrodes is 60° , the power supply of which is carried out from special electric power converters.

Based on the development of a complex of mathematical models of coupled electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes in the proposed six-electrode unit at various power supply modes, regularities of the formation of a multi-vortex structure of vertical and azimuthal flows in the furnace melt and convective heat transfer are revealed, taking into account the influence of natural convection and changes in the constructive parameters of the unit.

An improvement was achieved in the conditions of melt mixing and temperature homogenization in the melt of the proposed six-electrode unit in comparison with three-electrode unit operating without additional mixing means.

Methodological provisions have been developed for choosing rational energy and constructive parameters of unit complexes and increasing their reliability, taking into account various industrial conditions for their operation. Technical and economic calculations confirmed the economic feasibility of introducing the proposed technical solutions to save energy and material resources.

Keywords: electrode unit, operating and design parameters, energy efficiency.