

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»

На правах рукописи



Портнова Ирина Васильевна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА
В ВАННЕ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ
ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ ВМЕСТИМОСТИ

05.16.02 – Metallurgy of black, colored and rare metals

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор техн. наук,
профессор И.М. Ячиков

Оглавление

Введение	5
Глава 1.Современные технологии перемешивания металла в дуговых печах и пути их совершенствования	11
1.1. Выплавка металла в электродуговых печах	11
1.2. Роль перемешивания расплава металла в ванне дуговых печей	13
1.2.1. Влияние перемешивания расплава металла на технологию выплавки стали в дуговой печи постоянного тока.....	14
1.2.2. Влияние перемешивания расплава на технологию выплавки синтетического чугуна в дуговой печи постоянного тока.....	17
1.3. Обзор существующих способов перемешивания металла в ванне дуговой печи постоянного тока	17
1.4. Анализ электромагнитных способов перемешивания металла в ванне дуговой печи.....	20
1.4.1. Индукционный способ перемешивания расплава металла.....	20
1.4.2. Кондукционный способ перемешивания расплава металла.....	23
1.4.3. Электровихревой способ перемешивания расплава металла	26
1.5. Конструктивные особенности дуговых печей постоянного тока, влияющие на поведение токонесущего расплава и электрической дуги	28
1.6. Задачи исследования.....	32
Глава 2. Моделирование процессов плавления ферромарганца и поведения напряженности магнитного поля и объемных электромагнитных сил в ванне с токонесущим расплавом	36
2.1. Технология выплавки стали 110Г13Л.....	37
2.1.1. Математическая постановка задачи плавления ферромарганца с учетом движения жидкого металла.....	41
2.1.2. Результаты компьютерного моделирования нагрева и плавления кусков ферромарганца в жидкой стали.....	45
2.2. Математическая модель напряженности магнитного поля вблизи токоподводов, используемых при кондукционном перемешивании металла ...	46
2.3. Результаты моделирования поведения магнитных полей в ванне дуговой печи постоянного тока от индукторов, используемых для кондукционного перемешивания металла.....	52

2.4. Математическая модель электромагнитных параметров и объемных электромагнитных сил, возникающих в ванне дуговой печи постоянного тока при электровихревом перемешивании металла	59
2.5. Моделирование поведения напряженности магнитного поля от токнесущего расплава в ванне дуговой печи постоянного тока	63
2.5.1. Поведение напряженности магнитного поля при одном подовом электроде.....	63
2.5.2. Поведение напряженности магнитного поля при двух подовых электродах.....	66
2.6. Моделирования влияния конструктивных параметров подовых электродов на характер объемных электромагнитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока.....	68
2.6.1. Влияние положения токоподводящих электродов на течения расплава в ванне ДППТ	68
2.6.2. Влияние токов, протекающих через подовые электроды, на объемные электромагнитные силы в ванне ДППТ.....	71
2.6.3. Влияние диаметров подовых электродов на объемные электромагнитные силы в жидкой ванне ДППТ.....	74
2.6.4. Влияние взаимного положения подовых электродов на распределение объемных электромагнитных сил в жидкой ванне ДППТ.....	77
2.7. Выводы по второй главе.....	80
Глава 3. Исследование на физической модели характера течения токнесущего расплава от внешних и собственных магнитных полей в жидкой ванне	81
3.1. Выбор критериев подобия для физического моделирования.....	81
3.2. Определение параметров экспериментальной физической модели	86
3.3. Описание экспериментальной установки и методика проведения исследований	88
3.4. Результаты визуальных экспериментальных исследований характера электровихревых течений при разном расположении катода и подовых электродов.....	92
3.5. Результаты экспериментальных исследований по оценке параметров электровихревых течений в ванне расплава.....	99
3.6. Результаты экспериментальных исследований кондукционного воздействия на металл	103

3.6.1. Исследование воздействия внешнего магнитного поля на токонесущую жидкую ванну (с использованием раствора поваренной соли в воде).....	103
3.6.2. Исследование воздействия внешнего магнитного поля на токонесущую жидкую ванну (с использованием расплава олова)	108
3.7. Выводы по третьей главе	111
Глава 4. Практические рекомендации по повышению эффективности электромагнитного перемешивания жидкой ванны с токонесущим расплавом в металлургических агрегатах.....	113
4.1. Рекомендации по применению электровихревого и кондукционного перемешивания в металлургических агрегатах	113
4.2. Совершенствование управления перемешиванием металла в ванне дуговой печи постоянного тока за счет характера изменения токов, протекающих через подовые электроды	121
4.3. Расчет экономической эффективности при использовании токоподвода к ДППТ в виде плоской спирали Архимеда	125
4.4. Выводы по четвертой главе	130
Заключение.....	131
Список сокращений и условных обозначений	133
Литература.....	134
Приложение.....	145
Приложение А	145
Приложение Б.....	146
Приложение В	147
Приложение Г.....	151
Приложение Д	153
Приложение Е.....	154

ВВЕДЕНИЕ

В металлургическом производстве в настоящее время в различные периоды выплавки металла используется процесс перемешивания жидкой ванны для получения качественного конечного продукта и снижения энергоемкости производства. В связи с этим обязательным элементом конструкции является наличие устройств, обеспечивающих качественное перемешивание металла, которое можно достичь с помощью продувки расплава металла газами или при использовании электромагнитных способов перемешивания.

С появлением дуговых печей постоянного тока (ДППТ), использующих перемешивание металла электровихревыми течениями (ЭВТ) без применения внешнего индуктора, вырос интерес к их изучению. В настоящее время по данным направлениям ведутся интенсивные работы в НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Тверском государственном техническом университете, Красноярском государственном техническом университете, Объединенном институте высоких температур РАН (г. Москва) и ряде других. Вопросами теории, конструирования и эксплуатации оборудования при электромагнитном воздействии на металлические расплавы в разное время занимались: Л.Л. Тир, М.Я. Столов, А.Б. Капуста, В.С. Малиновский, С.И. Нехамин, Б.В. Чекин, В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков, А.Н. Семко, О.В. Казак и другие.

Актуальность работы

Перемешивание расплава металла посредством ЭВТ наибольший интерес представляет с точки зрения интенсификации технологических периодов плавки. Оно преследует три основные задачи: ускорение металлургических процессов (рафинирования, растворения, диффузии); механизацию перемешивания ванны и скачивания шлака; выравнивание температуры и химического состава металла по объему ванны в периоды, когда собственное движение металла слабо и затягивает плавку.

Технология перемешивания металла в ДППТ за счет возбуждения ЭВТ успешно применяется как в России (ОАО «Ковровский электромеханический завод», г. Ковров; ОАО «ПО Усольмаш», г. Усолье-Сибирское и др.), так и за рубежом (ОАО «Бобруйский машзавод, республика Беларусь; АО «Транснаци-

ональная Компания «Казхром», Казахстан; «Aluminium alloys of Estonia AS», Эстония; ООО «Струмтех, ЛТД», Украина). При ее использовании в ДППТ устанавливают один осевой графитированный электрод (катод) и не менее двух подовых электродов (ПЭ). Чаще всего эту технологию используют в ДППТ вместимостью до 25 т, которые находят все большее применение в «малой» металлургии машиностроительного и литейного производства при выплавке стали, чугуна, ферросплавов, цветных металлов и сплавов, переработке шлаков, при этом печи работают по классическому циклу.

Однако практические и теоретические аспекты процесса перемешивания расплава металла в ванне посредством ЭВТ, возникающих в результате установки нескольких ПЭ, остаются до сих пор слабоизученными. Отсутствуют инженерные практические рекомендации и методики по выбору параметров ПЭ и токов, протекающих через них при электровихревом перемешивании.

При кондукционном перемешивании внешние магнитные поля могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на технологические процессы, протекающие в ваннах с жидким металлом. Возникающие интенсивные течения могут интенсивно разрушать футеровку вблизи подовых электродов, приводить к характерному движению дуги по поверхности жидкого расплава или ее сильному отклонению от вертикали.

В настоящее время кондукционное перемешивание металла в ванне ДППТ практически не используется из-за недостаточного исследования воздействия внешних магнитных полей на токонесущий расплав и наличия простых, надежных конструкций по созданию внешних магнитных полей с заданной или управляемой конфигурацией. Недостаточно изученными остаются вопросы, связанные с взаимодействием токонесущего расплава в ванне ДППТ с собственными и внешними магнитными полями и характером возникающих объемных электромагнитных сил (ОЭМС).

Поэтому исследование влияния собственных и внешних магнитных полей и ЭВТ на перемешивание жидкой ванны в ДППТ представляет собой важную научную и прикладную задачу.

Цель работы: повышение эффективности электровихревого и кондукционного перемешивания расплава металла под действием объемных электромаг-

нитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока за счет выбора рациональных конструктивных и технологических параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить влияние интенсивности движения расплава на динамику нагрева и плавления куска ферромарганца;
- посредством компьютерного моделирования изучить поведение напряженности магнитного поля и объемных электромагнитных сил в жидкой ванне при разной конструкции токоподводов к подовому электроду, выбрать рациональные конструкции внешних индукторов, используемых при кондукционном перемешивании;
- посредством компьютерного моделирования определить влияние конструктивных параметров для одного или двух подовых электродов, токов протекающих через них, на собственное магнитное поле и объемные электромагнитные силы в ванне расплава ДППТ. Найти параметры и технологические режимы, повышающие эффективность электровихревого перемешивания расплава и разработать практические рекомендации;
- на физической модели исследовать характер течения токонесущего расплава в жидкой ванне при воздействии на него объемных электромагнитных сил, возникающих под действием внешних и собственных магнитных полей;
- найти параметры конструкции ДППТ малой вместимости, повышающие эффективность электровихревого и кондукционного перемешивания жидкой ванны.

Методы исследования. Решение поставленных задач проводилось на основе физического моделирования с использованием с использованием методов теории приближенного подобия и размерности, а также компьютерного моделирования с помощью оригинальных программных продуктов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Теоретически обоснована возможность управления интенсивностью и направлением течения металла в ванне ДППТ за счет изменения соотношения токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды. Рекомендован выбор характеристик пульсирующих токов, протека-

ющих через подовые электроды для повышения эффективности перемешивания расплава в ванне ДППТ.

2. Установлены зависимости о динамике нагрева и плавления кусков ферромарганца различного размера от скорости их обтекания жидкой сталью.

3. Созданы математическая модель и программный продукт, позволяющие посредством компьютерного моделирования находить распределение напряженности внешнего магнитного поля вблизи токоподводов разной формы к подовому электроду при кондукционном перемешивании металла в ванне ДППТ. Получено распределение объемных электромагнитных сил и определен характер электровихревого течения в ванне ДППТ при подключении одного или двух подовых электродов и при смещении графитированного электрода от оси ванны.

4. Получены новые закономерности о влиянии диаметров подовых электродов и их расположения в ДППТ на интенсивность электровихревых течений и объемных электромагнитных сил, новые экспериментальные данные о характере течения токонесущего расплава при внешнем вертикальном магнитном поле и характере течений в жидкой ванне с одним и двумя подовыми электродами под действием собственного магнитного поля.

Практическая значимость:

1. Разработаны технические рекомендации по проектированию новых и реконструкции существующих ДППТ, приводящие к повышению эффективности перемешивания жидкометаллических расплавов.

2. Установлено, что при кондукционном перемешивании наиболее перспективной является конструкция токоподвода в форме плоской спирали Архимеда, имеющей 2–4 витка, а при использовании токоподвода в форме винтовой линии – не более 5–6 витков (пат. на ПМ 119556, 126810 РФ).

3. При электровихревом перемешивании в ДППТ с двумя подовыми электродами рекомендуются следующие конструкционные параметры: подовые электроды должны образовывать двугранный угол между их осями и осью симметрии ванны $70\text{--}100^\circ$; расстояние от оси ванны до осей подовых электродов - $0,3\text{--}0,4$ радиуса ванны; площадь контакта подового электрода с металлом должна быть минимально возможной и определяться его тепловой работой.

4. Для интенсификации процесса электровихревого перемешивания в ванне

ДППТ с одним подовым электродом рекомендуется смещать его от оси ванны на расстояние до 0,3–0,4 радиуса ванны и (или) сдвигать графитированный электрод на расстояние до 0,8 радиуса ванны. Сводовой электрод может быть выполнен из неграфитированного материала и в период перемешивания ванны работать в режиме заглубления.

5. Предложены новая конструкция ДППТ (пат. 52990 на ПМ РФ), способ ведения электроплавки в ДППТ (пат. 2293268 РФ), конструкции токоподвода к ДППТ (пат. 119556, 126810 на ПМ РФ). Получены 2 свидетельства о госрегистрации программ для ЭВМ (№ 2012661209, 2014661999).

Достоверность и обоснованность. Достоверность результатов исследований обеспечивается применением современных измерительных приборов. Результаты экспериментов неоднократно проверялись на повторяемость. Адекватность математической и компьютерной моделей проверялась сравнением результатов с известными экспериментальными и литературными данными других авторов. Полученные материалы не противоречат известным физическим закономерностям и базируются на современных фундаментальных положениях и законах.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: VII и X Конгрессах сталеплавателей (г. Магнитогорск, 2002, 2008 гг.); на Международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии» (г. Москва, 2002 г.); на ежегодных региональных научно-технических конференциях «Новые программные средства для предприятий Урала» (г. Магнитогорск, 2002, 2003, 2004 гг.); на ежегодных научно-технических конференциях ГОУ ВПО «МГТУ» (г. Магнитогорск, 2005–2007 гг.), на Российских школах по проблемам науки и технологий (Миасс, 2004, 2005 гг.); на Международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (г. Челябинск, 2004, 2007, 2015 гг.); на 3-й Международной научно-практической конференции «На передовых рубежах науки и инженерного творчества» (г. Екатеринбург, 2004 г.); на VII съезде литейщиков (г. Новосибирск, 2005 г.); на Международной научно-практической

конференции «Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества» (г. Новокузнецк, 2006 г.); на Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» (Екатеринбург, 2012 г.), на Международной научной конференции «Информационные технологии и системы» (Челябинск, 2014 г.); на Российской конференции по магнитной гидродинамике (г. Пермь, 2012, 2015 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 работа в отечественных и зарубежных изданиях, из них: 1 – монография; 7 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 – в изданиях, входящих в базу цитирования «Scopus», получены 2 свидетельства о государственной регистрации разработки на пакет программ, 4 патента РФ.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав и заключения и приложений. Она содержит 144 страницы машинописного текста, включающего 79 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 136 наименований и приложения.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ И ПУТИ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

1.1. Выплавка металла в электродуговых печах

В настоящее время в качестве плавильных агрегатов для получения металла используются дуговые сталеплавильные печи переменного тока (ДСП) и ДППТ (рисунок 1.1). Они выполнены из идентичных огнеупорных материалов, имеют аналогичное исполнение основных конструктивных элементов, применяют одинаковые схемы загрузки шихты и слива металла, используют одни и те же технологические процессы. Однако печи имеют существенные отличительные особенности: в ДППТ устанавливают один или несколько подовых электродов [1–3] и они имеют токопроводящий расплав.

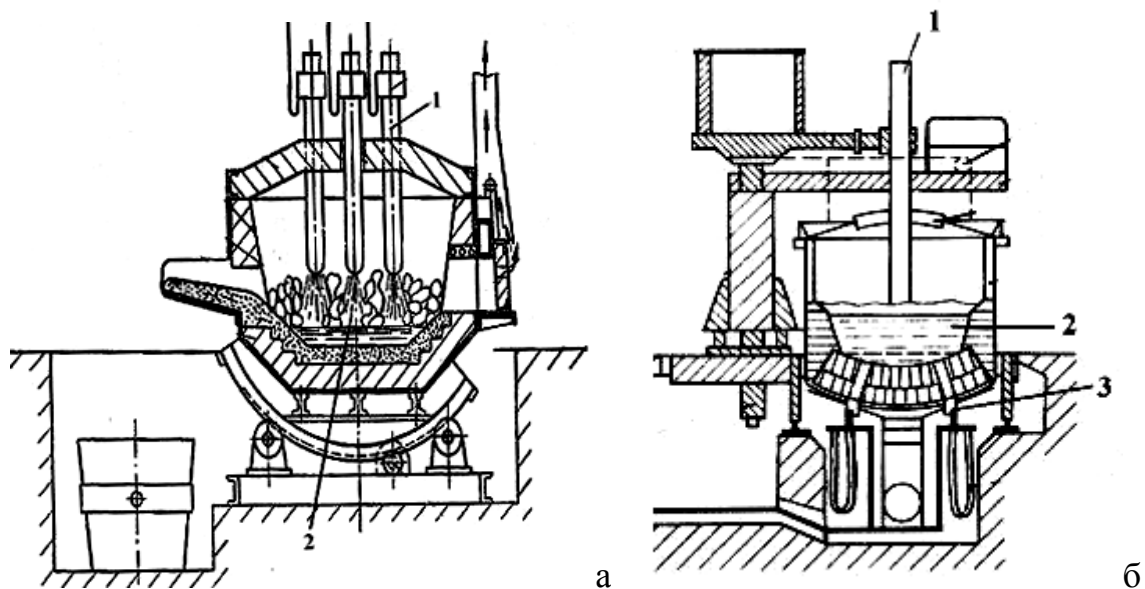


Рисунок 1.1 – Схемы дуговых плавильных печей:
а – переменного тока; б – постоянного тока; 1 – сводовый электрод;
2 – расплав металла; 3 – подовый электрод

Основное отличие проведения плавки металла вызвано протеканием физического процесса, происходящего в дугах постоянного и переменного тока, и характером взаимодействия электромагнитного поля постоянного и переменного тока с токопроводящим расплавом. Дуга в ДППТ более устойчива, чем в ДСП. Это позволяет использовать высокозашлакованную шихту.

В литейном производстве в России сложилась ситуация, когда большое

значение приобретает оснащение заводов малотоннажными плавильными агрегатами вместимостью до 25 т, имеющими широкие возможности по реализации технологических процессов и большую гибкость при переходе с одного технологического процесса на другой [1]. В настоящее время у промышленников вновь вырос интерес к использованию ДППТ, который вызван целым рядом их преимуществ по сравнению с печами переменного тока [4–7]. Это прежде всего:

- наличие токонесущего расплава;
- высокая мобильность;
- возможность включения и отключения печи в любой период;
- выплавка разных по массе плавов от 50 до 130 % от номинальной садки;
- низкий фликкер-эффект;
- подключение двух электропечей к одному источнику электропитания, в которых можно получать различные сплавы, вплоть до высоколегированных марок стали, а также цветные металлы и их сплавы;
- снижение расхода ферросплавов;
- существенное снижение расхода графитированных электродов [5, 9–15].

Вместе с тем ДППТ имеют и недостатки, выявленные в период их эксплуатации [3, 5, 16–18]:

- возникают трудности с зажиганием дуги после междуменного простоя на печах с кислой футеровкой;
- существуют конструктивные трудности с выполнением токоподвода на печах с выкатным подом;
- наличие воды под подиной для охлаждения подовых электродов повышает опасность взрыва в случае порыва металла через подину;
- удорожание графитированных электродов;
- требуют высококвалифицированный обслуживающий персонал и высокую культуру производства.

Серьезным фактором безопасности ДППТ является конструкция ПЭ, одного из основных элементов печи, которая связана с уходом жидкого металла через подину печи. ПЭ служат для подвода тока к шихте и расплаву металла, и системы перемешивания металла. Они обеспечивают работу печей с полным сливом металла, горячие ремонты подины, ее взрывобезопасность и долговечность. В России применяются конструкции подовых электродов, разработанные фир-

мами «Экта» (г. Москва) [19], «МТФ» (г. Набережные Челны) [20], ООО «НПФ КОМТЕРМ» (г. Москва) [21].

По стоимости ДППТ на 10–35% дороже ДСП из-за затрат на полупроводниковый источник питания, но при необходимости использования более мощной газоочистки на ДСП и применения фильтрокомпенсирующих устройств для обеспечения заданного энергосистемой качества потребляемой электроэнергии капитальные затраты для обоих вариантов примерно одинаковы, а иногда ДСП оказываются дороже ДППТ. Поэтому в каждом случае необходим детальный технико-экономический анализ с учетом всех особенностей ДППТ и ДСП, а также технологического процесса [5].

1.2. Роль перемешивания расплава металла в ванне дуговых печей

Перемешивание ванны расплава металла в дуговых печах необходимо для нормального протекания технологического процесса и характеризуется двумя основными факторами: эффективностью перемешивания и расходом энергии. Однако возможность управления этими процессами в электропечах исследована мало.

Чаще всего перемешивание расплава металла в ванне дуговых печей ведут в восстановительный период. Плавка ведется под восстановительным белым шлаком, содержащим к концу периода $\text{FeO} < 0,5\text{--}1,5\%$. Это позволяет решить ряд задач, таких как диффузионное раскисление металла (основная отличительная черта этого периода); регулирование температуры металла; окончание процесса десульфурации металла (достижение остаточного содержания серы согласно требованиям к химическому составу стали); доведение химического состава металла до заданного.

При решении металлургических задач процесс перемешивания металла и взаимодействие его со шлаком принято рассматривать как способ достижения определенного технологического результата, направленного на повышение качества металла. Перемешивание жидкой ванны влияет на [6, 9–11, 22]:

- легирование;
- процессы десульфурации и дефосфорации;
- удаление неметаллических включений;
- удаление водорода и азота;
- глубокое обезуглероживание металла.

Таким образом, процесс перемешивания расплава металла в ванне дуговой печи является одним из важных факторов, влияющих на повышение производительности печи и качество металла. Кроме того, без перемешивания в современных условиях невозможно проведение процесса автоматизации выплавки металла.

1.2.1. Влияние перемешивания расплава металла на технологию выплавки стали в дуговой печи постоянного тока

Большое практическое значение в технологическом плане имеет интенсификация перемешивания металла в зоне, непосредственно прилегающей к шлаку. Это, прежде всего, относится к эффективности десульфурации стали синтетическим шлаком. Эффективность десульфурации металла шлаком характеризуется величинами равновесного и фактического коэффициента распределения серы между шлаком и металлом ($L_S=(S)/[S]$). На практике используется перемешивание с помощью электромагнитного поля либо посредством продувки металла аргоном через донный продувочный блок. Учет условий и интенсивности перемешивания металла в печи позволяет скорректировать соответствующим образом процесс обработки в целом.

Перемешивание ванны может осуществляться за счет внешних устройств. Например, электромагнитное устройство, которое по принципу своего воздействия представляет собой асинхронный двигатель: ротор (жидкий металл) пронизывается бегущим (в случае статора) или вращающимся (в случае электромагнита) магнитным полем и увлекается в движение по направлению последнего. Однако наряду с принципиальным сходством перемешивающее устройство имеет ряд существенных отличий. Отсутствует магнитный сердечник в роторе ($\mu=1$); массивный ротор, по объему которого протекают индуцированные токи с резко выраженным поверхностным эффектом и эффектом близости.

Плотность индуцированных токов i_h снижается с увеличением расстояния x до подины ванны и выражается по известной формуле [16]

$$i_h = i_0 e^{-2\pi x \sqrt{\frac{f}{\rho}}},$$

где i_0 – плотность тока на дне ванны, А/см², ρ – удельное сопротивление металла, Ом·см; f – частота тока, Гц.

Усилие P_h на 1 см² пропорционально квадрату плотности тока и выражается

$$P_h = P_0 e^{-4\pi h \sqrt{\frac{f}{\rho}}},$$

где P_0 – усилие у дна ванны, г/см^2 .

При использовании электромагнитного перемешивания (ЭМП) возрастает скорость десульфурации. Это позволяет сократить время продолжительности восстановительного периода заданной степени десульфурации на 0,5–1,0 ч быстрее, чем при его отсутствии или более низкого содержания серы. Данные по изменению содержания серы в расплаве металла в 10 и 30 т печах во время восстановительного периода приведены на рисунке 1.2 [23].

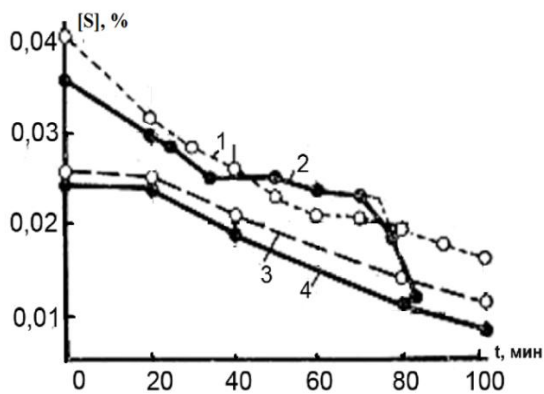


Рисунок 1.2 – Содержание серы в расплаве металла от времени (в восстановительный период):
1, 2 – ДСП вместимостью 30 т;
3, 4 – ДСП вместимостью 10 т;
— с ЭМП; - - - без ЭМП [23]

ЭМП оказывает значительное влияние на кинетику физико-химических процессов. При использовании ЭМП, по результатам Н.В. Огорокова, А.Г. Зубарева и других исследователей, возрастает скорость удаления кислорода и серы (на 70–100 %), а также растворение легирующих добавок. Это способствует гомогенизации расплава металла по температуре и химсоставу [16, 24]. При применении ЭМП, по данным Л.А. Мальцева [25], перепад температуры по глубине ванны ДСП-25 в восстановительный период снижается от 100 до 5–20 °С, гидродинамическое движение жидкометаллической ванны усиливает диффузионное удаление примесей, в результате содержание неметаллических включений уменьшается, а «эффективная» поверхность раздела металл – шлак растет. Следовательно, сокращение восстановительного периода возможно без ухудшения качества металла на 20–30 %.

На рисунке 1.3 приведены графики распределения температуры металла и шлака по глубине ванны в 20-тонных дуговых печах в конце периода расплавления. Замеры температуры осуществляли в зоне между электродами второй и третьей фаз на расстоянии половины радиуса между стенкой печи и осью ванны

[23]. Результаты показали, что при ЭМП процессы усреднения по температуре и химическому составу осуществляются быстрее, чем при перемешивании вручную, которое проводили в 50–60-е годы прошлого века.

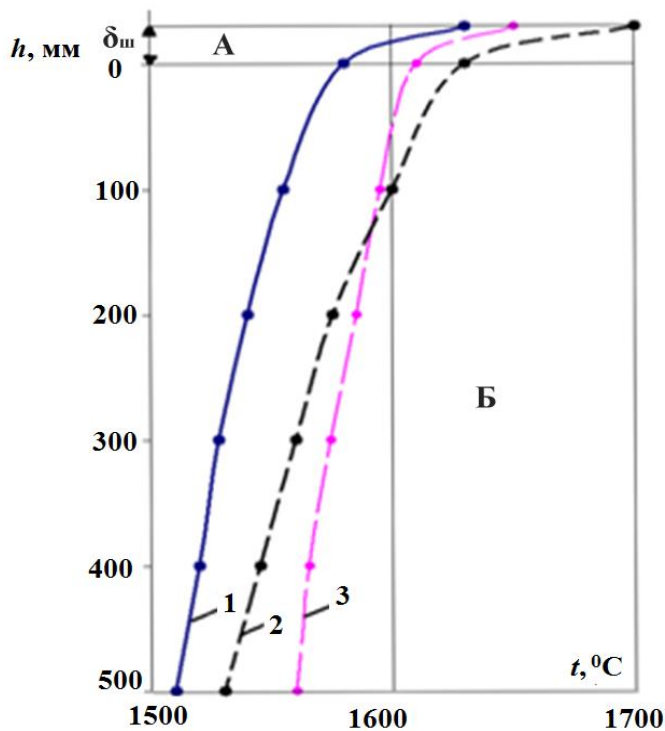


Рисунок 1.3 – Распределение температуры шлака и металла по глубине ванны:
 А – шлак;
 Б – жидкий металл;
 1 – без ЭМП;
 2 – с ЭМП;
 3 – ручное перемешивание

В восстановительный период плавки электромагнитное перемешивание существенно ускоряет процесс раскисления (рисунок 1.4). В результате конечное содержание кислорода оказалось в три раза меньше, чем без ЭМП, время для достижения одинакового конечного содержания ($\sim 0,0015\% [\text{O}]$) сокращается в 1,7 раза [27].

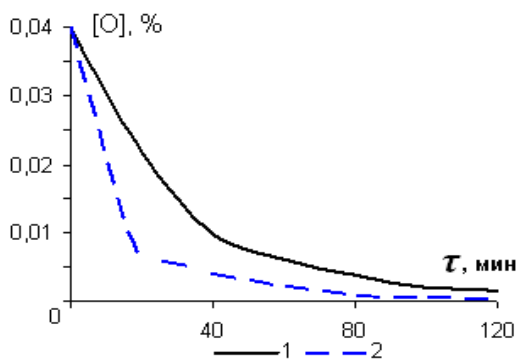


Рисунок 1.4 – Влияние электромагнитного перемешивания на скорость раскисления в 15-т печи: 1 – без перемешивания; 2 – с электромагнитным перемешиванием [23]

Таким образом, анализ рассмотренных данных показывает, что для улучшения процессов раскисления, гомогенизации расплава металла при введении легирующих присадок, усреднения по температуре и химическому составу целесообразно проводить электромагнитное перемешивание.

1.2.2. Влияние перемешивания расплава на технологию выплавки синтетического чугуна в дуговой печи постоянного тока

Синтетический чугун (СЧ) можно получать в дуговых печах [6, 26, 27]. Сырьем для его производства служат низкосортные металлоотходы, такие как стальной лом, листовая обрезь, стружка и др. Примером успешного получения СЧ могут служить показатели ОАО «Курганмашзавода», где отработана технология получения серых и высокопрочных чугунов различных марок в ДППТ-6АГ.

По данным авторов [6, 27], при получении синтетического чугуна в ДСП металлурги испытывали трудности с процессом науглероживания расплава при температуре 1400 °С без перемешивания ванны. Усвоение углерода металлом из графитовой крошки в ДСП, работающей на переменном токе, составляло 50–55 %, длительность плавки – 150 мин. Для того чтобы началось растворение графита в расплаве, требовался перегрев металла у подины до 1500–1550 °С. При выплавке СЧ в ДППТ и применении ЭМП перемешивания усвоение углерода составило 75 %, а длительность плавки – 80 мин. Был получен следующий химический состав выплавленного СЧ: С – 3,60 %, Mn – 0,96%, Si – 2,18 %, S – 0,027 %, P – 0,086%, что соответствует марке СЧ15 по ГОСТ 1412-85.

Высокий эффект достигнут при комплексном подходе к организации плавки металла на ДППТ, при котором осуществляется управляемое перемешивание ванны и активное взаимодействие жидкометаллического расплава со шлаком, что определяет получение металла высокого качества.

Таким образом, при получении синтетического чугуна одним из факторов, влияющих на технико-экономические показатели работы печи и качество конечного продукта, является перемешивание металла, а приведенные данные подтверждают значительное влияние ЭМП на технологический процесс и качество конечного продукта.

1.3. Обзор существующих способов перемешивания металла в ванне дуговой печи постоянного тока

В настоящее время в металлургических агрегатах применяют многочисленные способы перемешивания металла, которые можно условно разделить на следующие группы (рисунок 1.5): химико-технологические; механические; гидродинамические и электромагнитные [28].

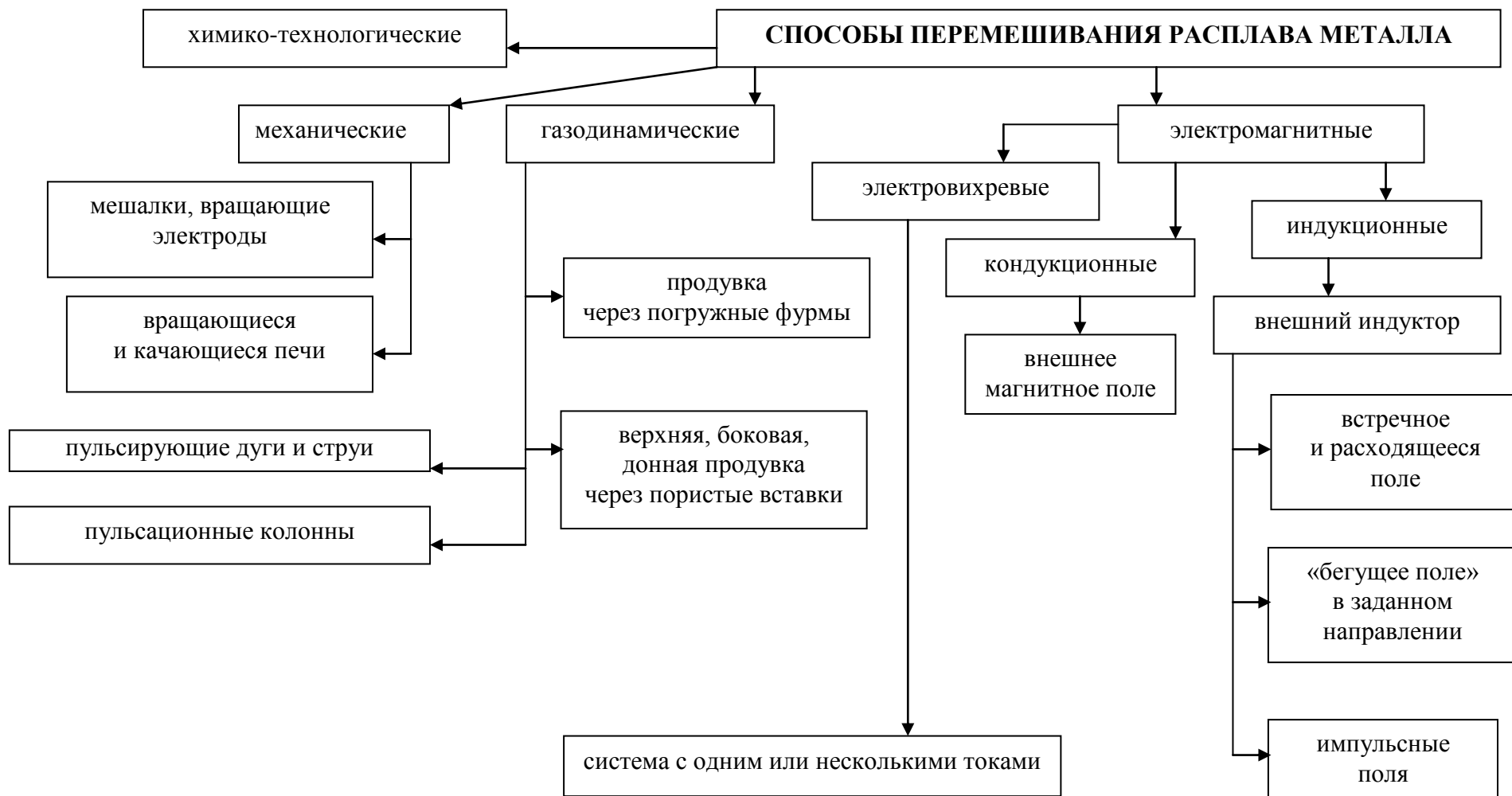


Рисунок 1.5 – Классификация способов перемешивания металла [28]

Химико-технологические способы используют особенности протекания химических реакций.

Механическое перемешивание основано на использовании падающей струи или струй инертных газов, специальных конструктивных элементов (мешалки, качалки, гребки и т.п. устройства), погруженных в расплав металла, или путем вибрационного воздействия [17, 25]. Однако механические способы перемешивания имеют ряд недостатков:

- быстрый износ рабочих частей перемешивающих устройств при повышенных температурах и агрессивном шлаке;
- возможность загрязнения металла включениями, образовавшимися при разрушении футеровки и мешалок;
- необходимость ручного перемешивания жидкого металла металлическими гребками для ускорения растворения легирующих. Эта устаревшая тяжелая операция требует дополнительного расходования электроэнергии на перегрев ванны и удлинения процесса плавки и связана с риском травмирования персонала [18, 22, 29]; не обладают комплексным воздействием на жидкий металл.

Газодинамические способы чаще всего связаны с использованием для перемешивания газовых потоков и плазменных струй путем верхней, боковой или донной продувки через фурмы и пористые вставки [22, 35, 31–33].

В металлургии внедрена технология Danarc, предусматривающая донное перемешивание металлического расплава газом, непосредственно вводимым в жидкую ванну ДСП, установку кислородных фурм для подачи в ванну смеси азота, природного газа и кислорода. Такие системы работают на печах ОАО «Молдавский металлургический завод» (г. Рыбница), ОАО «ММК» (г. Магнитогорск) и др. [31, 34, 35].

Перемешивание металла может осуществляться путем вдувания метана в дугу, что ускоряет перенос тепла от дуг к расплаву металла, приводит к ускорению процесса удаления азота из расплава. Повышение температуры поверхности металла вызывает более высокие скорости металлургических реакций на поверхности раздела газ-металл (рисунок 1.6) [36].

Однако среди существующих методов воздействия на перемешивание расплава особое место занимает электромагнитный способ, которому свойственно бесконтактное воздействие на жидкий металл.

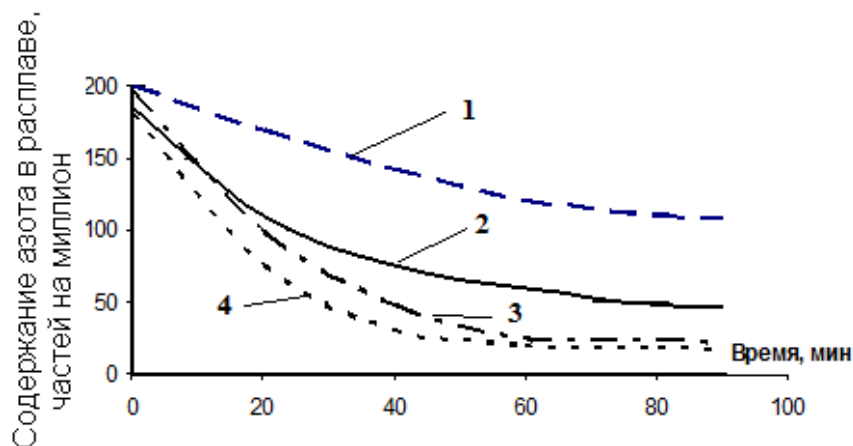


Рисунок 1.6 – Изменение содержания азота в расплаве от времени продувки при вдувании водорода и метана с перемешиванием расплава (4) и без перемешивания расплава (1, 2, 3): 1 – чистый аргон; 2 – 90% Ar+10% H₂; 3, 4 – 95 % Ar+5% CH₄ [36]

1.4. Анализ электромагнитных способов перемешивания металла в ванне дуговой печи

Электромагнитное перемешивание металла позволяет получать высококачественный металл и применяется для повышения структурной и химической однородности металла. ЭМП расплава возможно за счет следующих способов силовых воздействий [37]:

- между внешним магнитным полем и индуцированными токами (индукционный способ перемешивания);
- между токами, протекающими между электродами через расплав с внешним магнитным полем (кондукционный способ перемешивания);
- между одним или несколькими токами, протекающими в ванне, с собственными магнитными полями (электровихревой способ перемешивания).

1.4.1. Индукционный способ перемешивания расплава металла

Первая конструкция перемешивающего устройства инж. Л.И. Морозенского, предложенная в 1928 г., не получила применения в практике металлургического производства, потому что применялся ток промышленной частоты ($f=50$ Гц), но его принцип был использован для создания более совершенных устройствах [38].

Наиболее распространенным способом индукционного перемешивания металла в конце XX века в дуговых печах стало применение двухфазного статора. Впервые система электромагнитного перемешивания была установлена на однокамерную печь

для плавки алюминия компанией АВВ в 1969 г. Технология ЭМП непрерывно совершенствуется и составляет серьезную конкуренцию остальным методам перемешивания. В настоящее время в мире функционирует не менее 500 систем ЭМП, которые в основном сосредоточены в Японии [17].

Основным компонентом системы ЭМП является индуктор с водяным охлаждением, который устанавливается снаружи на боковой стенке или под днищем печи. Интенсивность бегущего электромагнитного поля убывает в экспоненциальной зависимости по мере удаления от магнитного сердечника обмоток индуктора, поэтому одним из важных критериев для подбора мощности перемешивателя является расстояние между индуктором и ванной металла. Чтобы магнитные силовые линии не рассеивались, а проникали вглубь расплава, необходима установка «окна» из листа немагнитной аустенитной стали, ввариваемого в корпус печи соответственно размеру индуктора.

По данным Л.Л. Тира, М.Я. Столова, в период легирования и рафинирования металла на индуктор подается примерно лишь половина полной мощности. Вследствие этого скорость естественной циркуляции расплава в ванне уменьшается в 1,4 раза по сравнению с ее значением в период расплавления. Такая ослабленная циркуляция недостаточна в период легирования, когда особенно важно эффективное перемешивание металла для ускорения усвоения легирующих добавок и выравнивания химического состава ванны [23].

В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины разработали способ, который позволяет создать условия для усиления перемешивания потоков металла в жидкой ванне. Самым эффективным и технологичным является такое расположение индуктора, чтобы асимметрия электромагнитной системы тигель-индуктор и гидродинамических граничных условий обеспечивала подавление вихревых контуров друг другом. Для подавления верхнего контура макропотоков расплава следует сместить индуктор таким образом, чтобы горизонтальная ось симметрии совпадала с верхней кромкой расплавленного металла (рисунок 1.7). При этом потоки расплава в центральной части ванны направляются вниз, ко дну тигля. На поверхности расплава образуется вогнутость, а выпуклости располагаются вблизи стенок тигля [41].

Наиболее широкое промышленное применение в конце прошлого века получили индукторы двухфазного тока низкой частоты (0,3–2 Гц), установленные под пе-

чью (рисунок 1.8). Под днищем печи, выполненной из немагнитного материала, размещается статор с двумя обмотками, токи которых сдвинуты по фазе на 90° . Создаваемое статорными обмотками бегущее поле приводит в движение слои металла. При переключении обмоток возможно изменение направления движения металла. Питание устройства производится от электромашинного преобразователя частоты или тиристорного преобразователя [17].

Индуктор генерирует низкочастотное бегущее магнитное поле, которое проникает через немагнитное «окно» корпуса печи и огнеупорную футеровку и приводит расплавленный металл в движение по принципу, подобному работе линейного электродвигателя, но с особенностями, характерными для электропроводных жидкостей, находящихся в движущемся магнитном поле.

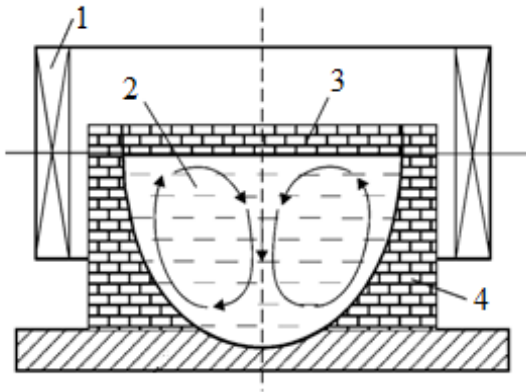


Рисунок 1.7 – Схема движения макропотоков жидкого металла: 1 – индуктор; 2 – расплав; 3 – крышка; 4 – тигель [41]

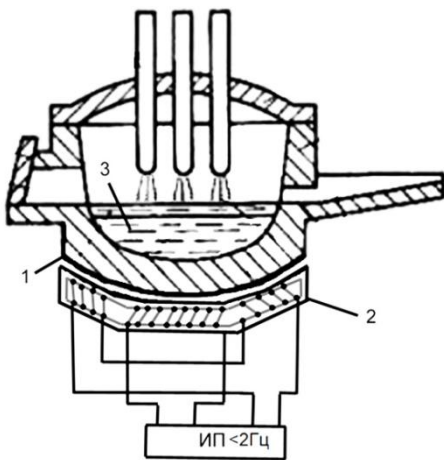


Рисунок 1.8 – Схема дуговой печи с внешним индуктором: 1 – днище печи; 2 – индуктор; 3 – расплав [17]

Индукционный способ перемешивания характеризуется интенсивным движением вблизи источника бегущего электромагнитного поля. Уменьшение интенсивности магнитного потока в зазоре между индуктором и металлом вынуждает снижать толщину футеровки стенок, а это служит причиной ее низкой стойкости, кроме этого, стоимость установки индуктора часто сопоставима со стоимостью плавильного агрегата.

Способ очень хорошо изучен и широко применялся в трехфазных дуговых печах во второй половине XX в., в настоящее время используется ограничено. Например, в цехах литейного производства, оборудованных печами малой и средней емкости без донной продувки, которые работают по двухшлаковой технологии. В них восстановительный пери-

од и доводка металла по химсоставу проводится непосредственно в печах, в которых (если не используется статор) отсутствуют какие-либо средства для перемешивания ванны, кроме механического перемешивания ручным инструментом. Поэтому проблема организации перемешивания жидкого металла сохраняет свою актуальность.

1.4.2. Кондукционный способ перемешивания расплава металла

Одним из первых устройств для ЭМП расплава кондукционным способом была дуговая печь с вращающейся дугой, предложенная Тельным С.И. в 1916 г. [38]. В футеровке днища однофазной печи с проводящей подиной размещался конический соленоид переменного или постоянного тока. При взаимодействии осевой составляющей магнитного поля с радиальной составляющей электрического поля дуга и расплав вращались с некоторой угловой скоростью. Применение переменного тока для питания соленоида приводило к появлению вторичных течений в меридиональных плоскостях за счет взаимодействия магнитного поля с индуцированным им азимутальным током [38, 42].

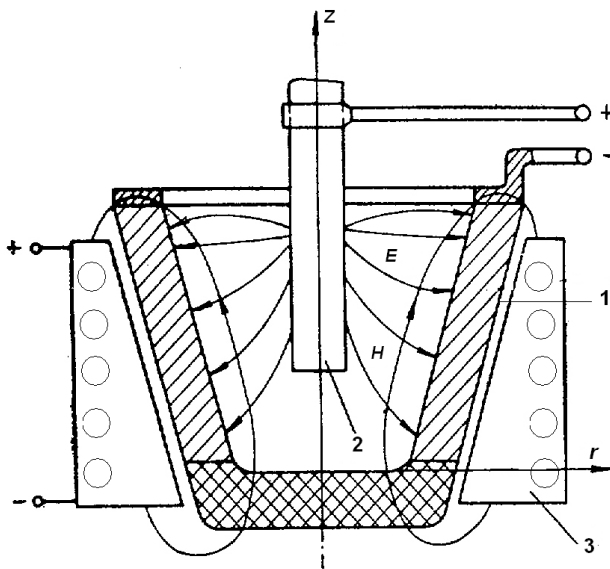


Рисунок 1.9 – Устройство для электромагнитного перемешивания:

- 1 – корпус; 2 – электрод;
- 3 – соленоид [43]

Известен способ ЭМП токопроводящих расплавов, при котором для перемешивания используют взаимодействие однородного аксиального магнитного поля и неоднородного радиального поля (рисунок 1.9) [43]. Корпус устройства для ЭМП имеет электропроводящие стенки и непроводящее дно. Вокруг корпуса размещен соленоид, который создает однородное аксиальное магнитное поле напряженностью H . При пропускании электрического тока через расплав в нем возникает неоднородное радиальное

электрическое поле напряженностью E . При воздействии сил, возникающих при взаимодействии магнитного и электрического полей, расплав в ванне приходит во вращение. Вследствие неоднородности электрического поля в ванне появляются различно ориентированные вихри, которые перемешивают расплав.

Таким образом, при кондукционном способе перемешивании для получения внешнего магнитного поля требуется дополнительное оборудование, которое необходимо защищать от перегрева, что в итоге сказывается на качестве металла и затратах на установку печи.

Так как мощность электромагнитного перемешивателя возрастает пропорционально квадрату немагнитного зазора устанавливать статор под подиной необходимо с минимальным зазором, при этом возрастет влияние магнитного потока, а это, в свою очередь, приводит к снижению стойкости футеровки.

Разработана конструкция ДППТ, где по внешнему диаметру корпуса установлены электромагниты постоянного тока. Электромагниты размещены выше максимального уровня металла, а их оси расположены под углом 120 град. относительно друг друга. Электромагниты включаются в случае отклонения дуги от центра плавильной камеры (рисунок 1.10) [44]. Однако такое расположение электромагнитов не позволяет эффективно воздействовать на процессы перемешивания объема жидкой ванны, они практически не влияют на ЭВТ в области ПЭ, что приводит к возникновению больших застойных зон в жидкой ванне и износу футеровки в области подового электрода.

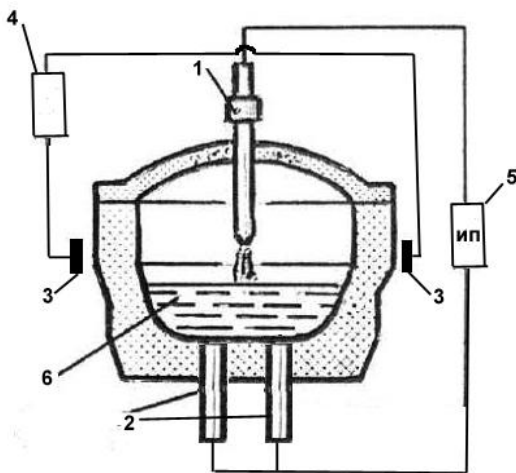


Рисунок 1.10 – Дуговая печь с двумя подовыми электродами:

- 1 – сводовый электрод;
- 2 – подовые электроды;
- 3 – электромагниты; 4 – блок управления электромагнитами;
- 5 – источник питания

В работе [45] предложена дуговая электропечь, которая содержит ванну, трехфазный силовой трансформатор, три электрода для плавения металла. Рабочие части электродов расположены в пространстве печи и пофазно подключаются к вторичным обмоткам силового трансформатора. Печь снабжена источником постоянного тока и трехфазной группой индуктивного сопротивления, а ванна выполняется с подовым проводником. При этом один полюс дополнительного источника постоянного тока подключается к подовому проводнику для соединения с токопроводящей частью шихты в ванне. Другой полюс – к нулевой точке силового трансформатора и/или к нулевым точкам

трехфазной группы индуктивного сопротивления для обеспечения одновременного

соединения через электрические дуги подового проводника, силового трансформатора и ванны печи (рисунок 1.11).

При работе дуговой электропечи переменный и постоянный токи накладываются друг на друга в каждой фазе в одном дуговом разряде. При использовании трех электродов дополнительно сохраняется пространство в верхней части печи для устройства шахты и подогрева в ней шихты отходящими газами.

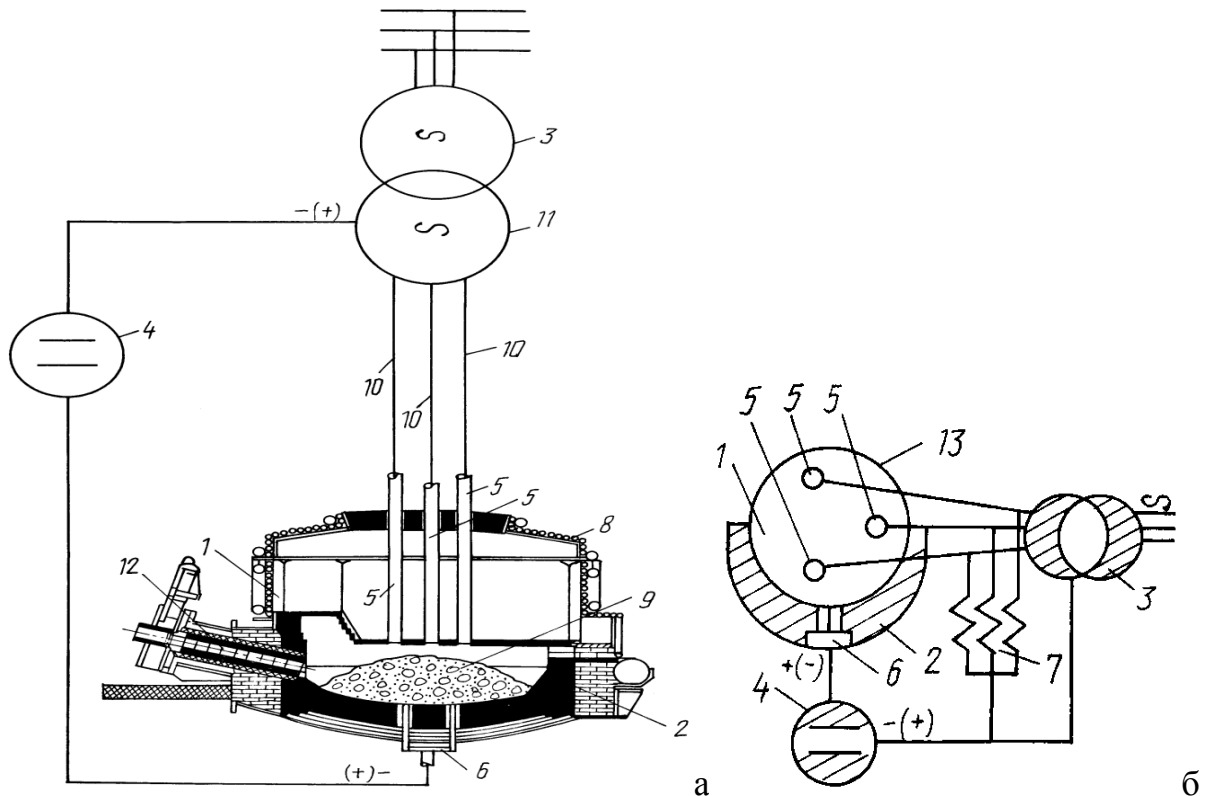


Рисунок 1.11 – Дуговая электропечь: а – общий вид; б – вид сверху; 1 – печь, 2 – футеровка ванны; 3 – источник переменного тока (силовой трансформатор); 4 – источник постоянного тока; 5 – силовые электроды; 6 – подовый проводник; 7 – группа индуктивного сопротивления; 8 – свод печи; 9 – «завалка» шихты; 10 – вторичная сеть силового трансформатора; 11 – вторичные обмотки силового трансформатора; 12 – выпускной желоб печи; 13 – вид сверху на свод [66]

Одновременное использование переменного и постоянного токов в одном дуговом разряде на большинстве токовых режимов увеличивает сечение дугового разряда и охватывает большую площадь поверхности нагреваемого металла. При такой подаче образуется энергетически насыщенный объем пространства над шихтой и расширяется площадь ввода энергии в шихту, увеличивается устойчивость горения дуг. Однако за счет возрастания площади воздействия растет влияние внешнего магнитного поля, что может привести к возникновению интенсивных течений, вымывающих футеровку.

Таким образом, показано, что технология кондукционного перемешивания рас-

плава металла является достаточно перспективной. Но в настоящее время практически не используется из-за недостаточного исследования воздействия внешних магнитных полей на токонесущий расплав и отсутствие простых, надежных конструкций по созданию внешних магнитных полей с заданной или управляемой конфигурацией.

1.4.3. Электровихревой способ перемешивания расплава металла

В металлургии существуют технологические процессы и агрегаты, где определяющую роль играет электрический ток большой силы, протекающий через объем жидкого металла. Объемные электромагнитные силы, обусловленные взаимодействием электрического тока с собственным магнитным полем и полем токоведущих элементов, генерируют в расплаве электровихревые течения, которые существенно влияют на работу таких устройств. Грамотное использование электровихревых течений повышает технико-экономические характеристики металлургического процесса и качество получаемого металла.

Для интенсификации массопереноса в дуговых печах, кроме традиционных способов, появляются технологии, основанные на особенностях движения токонесущего расплава под действием собственных электромагнитных полей, а также конструктивных характеристик печи и особенностей электрических регуляторов источников тока. Изменяя количество и положение сводовых [46, 47] или подовых электродов [48, 49], можно регулировать интенсивность движения металла, следовательно, и его перемешивание.

В России, Украине, Казахстане, Эстонии успешно работают ДППТ с перемешиванием расплава при помощи ЭВТ [8–12, 27, 49–51]. Главным отличием этих печей от существующих является установка двух и более ПЭ и периодическое изменение тока, проходящего через них [11, 20, 21, 27] (рисунок 1.12). Для реализации процесса перемешивания ЭВТ в подине печи устанавливают не менее двух ПЭ, смещенных относительно оси ванны. Под пятном дуги развивается интенсивное движение металла. Доля вводимой непосредственно в расплав энергии из дуги достигает 80–90%, холодный металл набегает под дугу и уходит внутрь расплава. Предотвращается локальный перегрев расплава. Взаимодействие горизонтальных и вертикальных составляющих тока с электромагнитным полем вызывает перемешивание металла в вертикальном сечении и вращательное движение в горизонтальном (рисунок 1.13) [7].

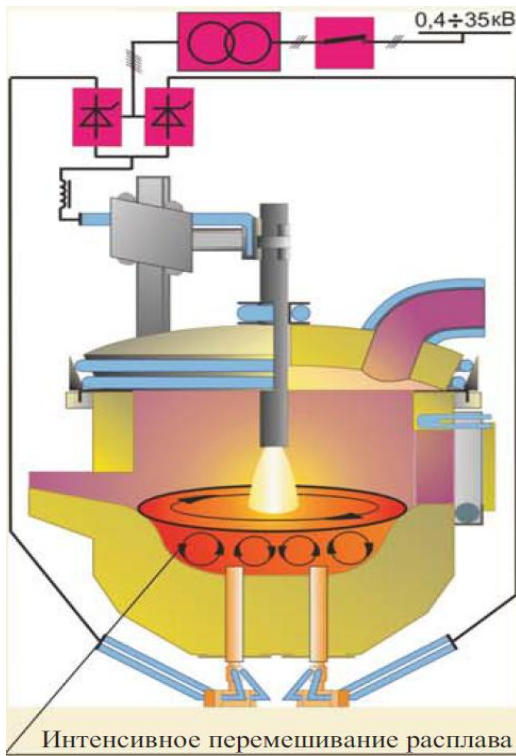


Рисунок 1.12 – Общий вид ДППТ с двумя подовыми электродами [20]

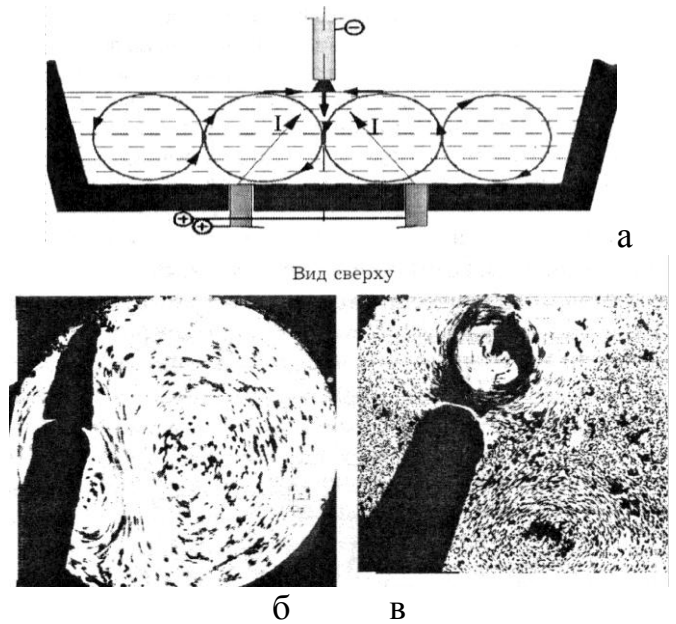


Рисунок 1.13 – Схема ЭМП перемешивания в ДППТ: а – перемешивание в поперечном сечении расплава [7]; б – система перемешивания включена; в – система перемешивания отключена

В Японии в 2010 г. на заводе Тахара компании Tokyo Steel успешно введена в эксплуатацию крупнейшая в мире двухэлектродная ДППТ, оборудованная системой Consteel®. ДППТ имеет одну ванну (масса выпускаемой плавки 300 т, общая вместимостью 420 т) и соответствует современным тенденциям развития сталеплавильного производства. Печь характеризуется высокой эффективностью благодаря низким эксплуатационным расходам, обусловленным малым энергопотреблением и небольшим штатом работников [52].

В ДППТ осуществляется непрерывная завалка скрапа при наличии жидкого остатка, обеспечивающего быстрое расплавление скрапа в ходе всего процесса. Подача постоянного тока осуществляется по сдвоенной схеме с полным контролем тока между ПЭ и сниженным уровнем воздействий на питающую электрическую сеть (рисунок 1.14).

ДППТ оборудована двумя катодами ($d_k=726$ мм) и четырьмя водоохлаждаемыми подовыми электродами; через каждый ПЭ (анод) протекают токи до 70 кА. По сравнению с ДППТ с одним катодом, печи с двумя катодами позволяет работать с токами до 280 кА, с электродами меньшего диаметра и меньшими нарушениями стабильной работы сети.

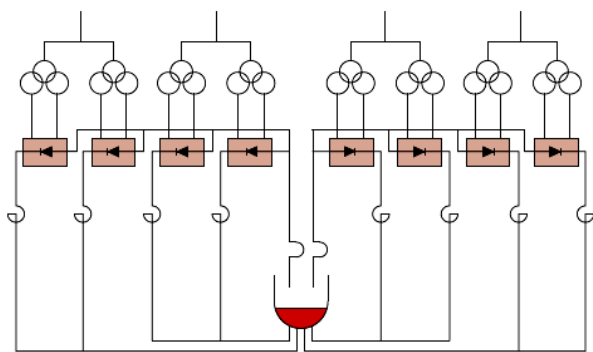


Рисунок 1.14 – Электрическая схема ДППТ [52]

Для совмещения процессов плавления шихты с обработкой металла шлаком, а также для защиты металла от печной атмосферы основную часть шлакообразующих материалов подают в печь вместе с шихтой. После расплавления металла шлак можно удалить, например с целью дефосфорации стали, при этом

новый шлак образуется за 2–3 мин после подачи шлакообразующих материалов. ЭВТ позволяют поддерживать большую эффективную поверхность «шлак-металл», обеспечивать транспортирование расплава в зону взаимодействия со шлаком, однородность температуры и химического состава металла.

По данным [20], в печах вместимостью от 0,5 до 25 т скорость движения жидкого металла в центральной части ванны составляет 0,12–0,35 м/с, т.е. реализуются режимы развитых турбулентных течений, при которых в ванне обеспечивается эффективное выравнивание полей температуры и концентрации вводимых в металл присадок.

Таким образом, электровихревое перемешивание расплава металла в ванне ДППТ является перспективным направлением, хотя и имеет меньшую научную проработку и опыт практического использования. Недостаточно изученными остаются вопросы, связанные с взаимодействием токонесущего расплава в ванне печи с собственными и внешними магнитными полями и характером возникающих объемных электромагнитных сил. Поэтому требуется их дальнейшее изучение посредством проведения теоретических и экспериментальных исследований.

1.5. Конструктивные особенности дуговых печей постоянного тока, влияющие на поведение токонесущего расплава и электрической дуги

В настоящее время в мировой металлургической промышленности успешно работают ДППТ с одним, двумя и четырьмя подовыми электродами в России, Украине, Казахстане, Эстонии, Японии и др. [6–12, 49–51].

Электрическая дуга является легкоподвижным проводником с током. Ее поведение определяется собственным и внешним магнитным полем. Для уменьшения нежелательного воздействия внешних магнитных полей на электрическую дугу из

литературы известны специальные конструкции печей [44, 48, 53–55].

В своде ДППТ установлены два графитированных электрода (рисунок 1.15). Они разнесены относительно друг друга и смещены в поперечном направлении относительно средней плоскости плавильной ванны в сторону расположения источника тока. На подине установлены четыре ПЭ по обе стороны от средней плоскости плавильной ванны. Они располагаются в вершинах правильного симметричного квадрата относительно средней плоскости P_2 плавильной ванны. Токоподводы катодов параллельны между собой и проложены напрямую к источнику питания. Токопроводы первой пары ПЭ прокладываются напрямую к источнику питания. Токопроводы второй пары ПЭ сначала огибают графитированные электроды, а затем направляются к источнику питания [53].

Такое расположение электродов и токоподводов уравнивает возникающие магнитные эффекты при прохождении электрического тока, чтобы компенсировать влияние токоподводов на формирующиеся в плавильной ванне электрические дуговые разряды. В результате электрические дуги подвергаются минимальным возмущающим воздействиям.

В работе [54] предлагается конструкция ДППТ, в которой под подиной установлены несколько токоподводов, подающих ток на графитированный электрод и токопроводящую подину. Подина соединена с токопроводами в нескольких местах. Ток подается через соединительные пластины для токопроводов, размещенные на подине. Токопроводы расположены ниже графитированного электрода в горизонтальной плоскости, проходя до стенки печи, а катод соединен с источником выпрямленного напряжения через электрододержатель (рисунок 1.16).

Для создания дополнительных магнитных полей напряжение на подовый электрод подают через несколько квадрантов подины посредством отдельных токопроводов. При этом токи в токопроводах регулируют в соответствии с отклонением дуги. Чтобы свести к минимуму влияние магнитных полей токопроводов на дугу, их размещают непосредственно на высоте расположения дуг и обеспечивают контролируемую корректировку их отклонения.

Такая конструкция дуговой печи позволяет контролировать и регулировать отклонение электрической дуги от центральной оси ванны. Это уменьшает ее влияние

на футеровку печи, но не дает возможность управлять движением расплава в различные периоды плавки.

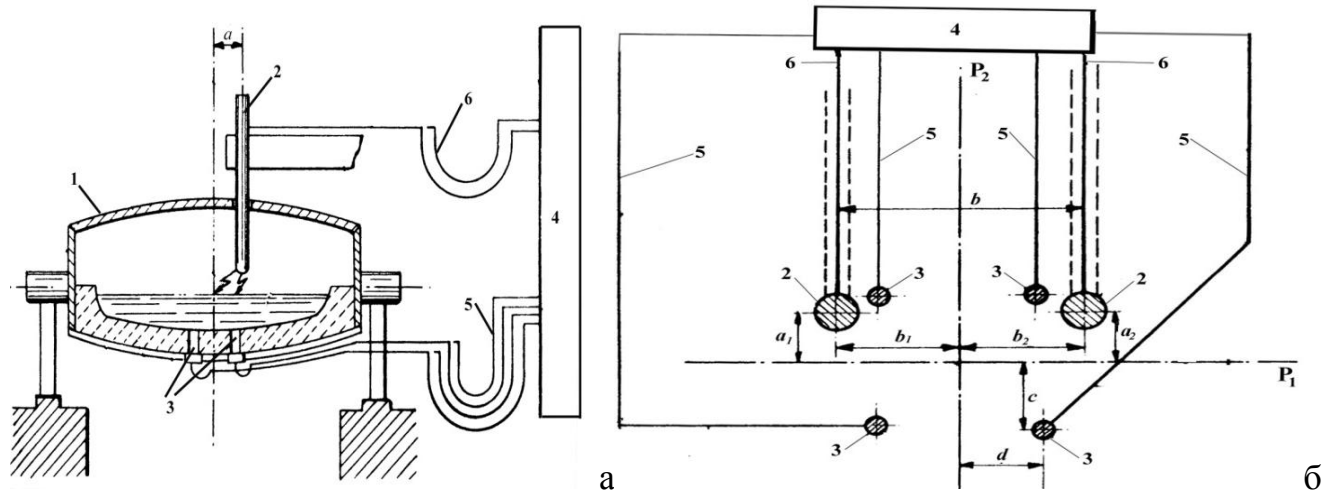


Рисунок 1.15 – Схема ДППТ: а – продольный разрез; б – подключение электродов к источнику питания, вид сверху: 1 – корпус печи, 2 – графитированные электроды, 3 – подовые электроды, 4 – источник постоянного тока, 5 – токоподводы к ПЭ; 6 – токоподвод к графитированным электродам

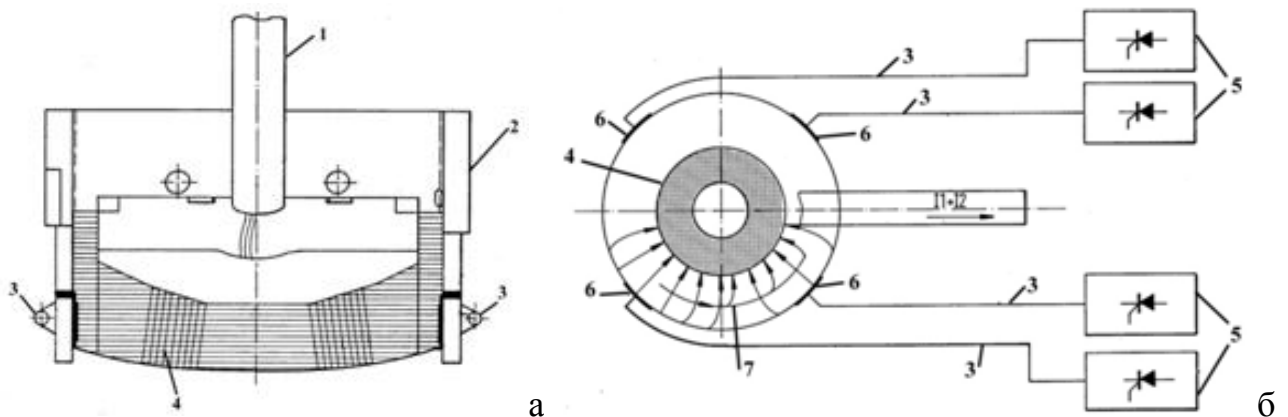


Рисунок 1.16 – Схема ДППТ: а – поперечное сечение; б – вид печи в плане; 1 – графитированный электрод; 2 – корпус печи; 3 – токопровод; 4 – анодные пластины; 5 – источник постоянного тока; 6 – соединительные пластины; 7 – компенсирующий ток

Известна ДППТ, которая имеет токопроводящую подину и медный кольцевой токопровод, расположенный с внешней стороны подины (рисунок 1.17), где образуется магнитное поле, которое удерживает электрическую дугу в центральной позиции [55]. При таком исполнении ДППТ обеспечивается равномерное распределение температуры расплавленного металла, если имеющиеся за металлоприемником печи магнитные поля, вызываемые, например, размещением подводящих или отводящих кабелей, не вызовут нарушение этой симметрии и не отклонят нежелательным образом электрическую дугу.

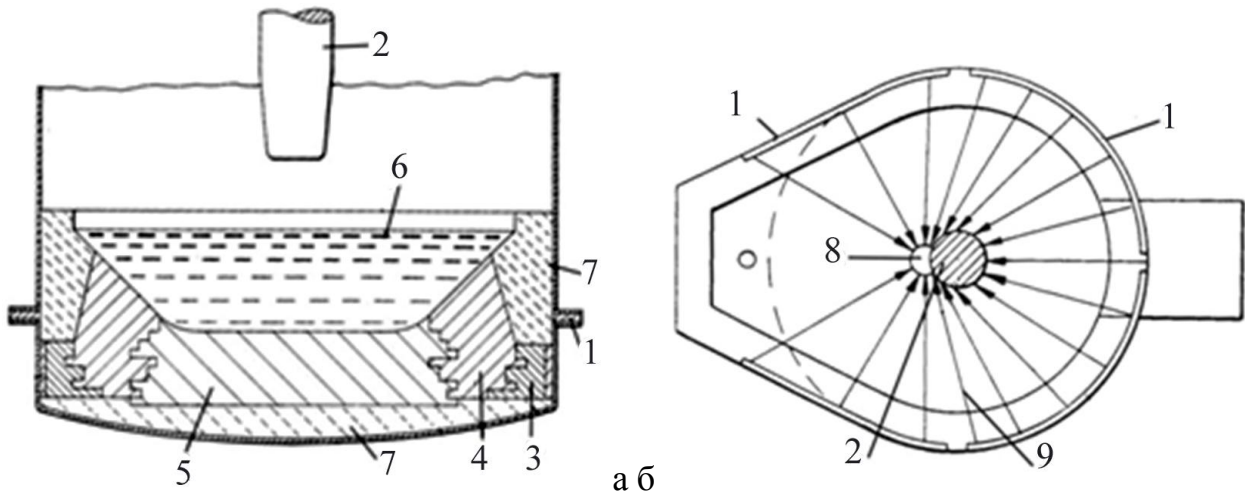


Рисунок 1.17 – Схема ДППТ: а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – медный кольцевой токопровод; 2 – графитированный электрод; 3 – графитовые кирпичи; 4 – кладка из электропроводного огнеупорного материала; 5 – набивная магнезитовая масса; 6 – расплав; 7 – изолирующая огнеупорная кладка; 8 – дуга; 9 – линии тока

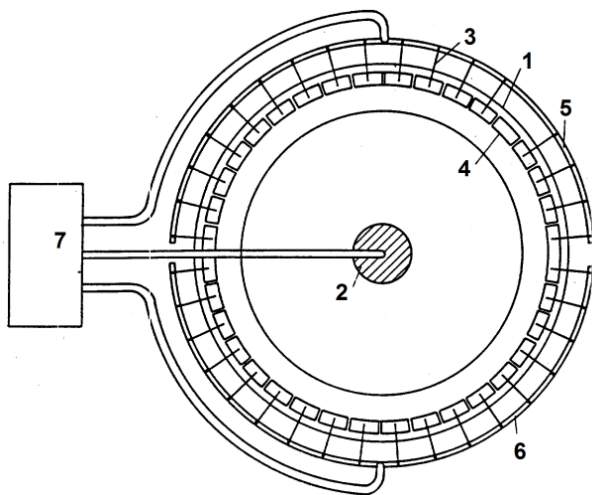


Рисунок 1.18 – Схема ДППТ, вид сверху: 1 – корпус печи; 2 – графитированный электрод, 3 – токопроводящие стержни; 4 – пластины, опирающиеся на металлическую обшивку; 5 – гибкий кабель, 6 – токопровод; 7 – источник питания [56]

Известна конструкция подового электрода для ДППТ [56], снабженная изолированными от внешней среды металлическими пластинами, охватывающими периферию электропроводящей подины. Пластины соединены с токоподводящими стержнями, выведенными из емкости печи за металлическую обшивку, при этом металлические пластины и токоподводящие стержни отделены электрической изоляцией от металлической обшивки (рисунок 1.18).

Токоподводящие стержни соединяются с токопроводами гибким кабелем. При этом создается максимально большой по площади электрический контакт и обеспечивается надежная токопередача между расплавом и электродом, который находится в емкости и не зависит от термической нагрузки на огнеупорную обшивку в токоподводящем проводнике. Однако магнитное поле токоподвода оказывает значительное влияние на электрическую дугу, вызывая при этом ее отклонение.

Однако магнитное поле токоподвода оказывает значительное влияние на электрическую дугу, вызывая при этом ее отклонение.

Все рассмотренные выше устройства направлены на удержание дуги в центре ванны, чтобы свести к минимуму асимметричное воздействие на футеровку, и практически не влияют на процессы перемешивания расплава, при этом значительно усложняют конструкцию печи.

1.6. Задачи исследования

В результате проведенного аналитического обзора установлено, что в металлургической промышленности существует ряд агрегатов, имеющих токонесущий расплав. Среди них наибольшее распространение получили ДППТ, в которых процессы перемешивания расплава металла на разных этапах электроплавки можно проводить электровихревым или кондукционным способами.

Наиболее известными фирмами-производителями дуговых печей постоянного тока в России являются ОАО «Сибэлектротерм» (г. Новосибирск), ООО «НПФ КОМТЕРМ», ООО «НТФ «ЭКТА»» (г. Москва), которыми с 2010 г. установлены ДППТ с двумя подовыми электродами: ДППТУ-6 в ОАО «СИБЛИТМАШ» (г. Новосибирск); ДПС-2, ДПС-12 в ООО «ВКМ-Сталь» (г. Саранск), две ДПС-15 в ООО ПК «БСЗ» (г. Брянск), ДППТ-3 в ОАО «ЧМЗ» (г. Чусовой), ДППТУ-0,5АГ в ОАО «Сухоложский завод вторичных цветных металлов», (г. Сухой Лог, Свердловская обл.), ДППТУ-3 в ЗАО «Невский литейный завод» (г. Санкт-Петербург), ДППТУ-1,5 в филиале ОАО «Компания «Сухой» «КНААЗ им. Ю.А. Гагарина» цех 22 ОАО «КНА-АПО» (г. Комсомольск-на-Амуре); ДППТУ-1,5 в ООО «НПФ «Промышленные технологии» (г. Рязань).

Среди зарубежных фирм-производителей ДППТ можно отметить такие фирмы, как ООО «Струмтех, ЛТД» (Украина), ООО «Завод ТЕРМОЛИТМАШ» (Украина), «Siemens VAI» (Германия), которые с 2002 г. ввели в эксплуатацию три ДППТ вместимостью 0,5, 3,0 и 6,0 т в ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог», ДСПТ-12-ИЗ в ЗАО «Элста», (г. Днепропетровск), ДППТ-0,5 на Колымском аффинажном заводе, РФ. Фирма «Siemens VAI» (Германия) запустила 120-тонную ДППТ на заводе Thuringen компании Arbed Group (Германия), 420-тонную ДППТ на заводе Тахара компании Tokyo Steel (Япония).

Анализ способов перемешивания металла и их сравнение показали, что для ДППТ технология перемешивания с использованием двух и более подовых электродов достаточно перспективна. Она получила реальное воплощение благодаря появлению мощных управляемых источников питания отечественного и зарубежного производства, использованию надежных подовых электродов и совершенствованию конструкции печи.

Проблемами движения металла в индукционных тигельных и дуговых печах и разработкой устройств управления движением, а также теории этих устройств начали заниматься в 60–80 гг. прошлого века. Центры изучения данных вопросов были сосредоточены во ВНИИЭТО (Москва) [22]. Сегодня работы по управлению движением расплава металла в ДСП ведутся в Сибирском федеральном университете [57], в НИТУ «Московский энергетический институт» [58], Тверском государственном техническом университете [15, 34, 59] и ряде других.

Физическая теория ЭВТ, возникающих при взаимодействии электрического тока с собственным магнитным полем, известна давно [60, 61]. Значительный вклад в ее развитие внесли сотрудники института физики АН ЛатССР, Шеффилдского университета (Англия), университета штата Колорадо (США) [22].

На возможность использования ОЭМС для интенсификации технологических процессов указывали Л.А. Верте и Н.А. Охременко [40]. В разработку теоретических основ ЭМП жидкого металла большой вклад внесли Н.В. Огороков, Г.А. Остроумов, М.Г. Резин, А.Г. Зубарев и другие [16, 24, 87]. Вопросами теории, конструирования и эксплуатации электромагнитных устройств для управления движением жидкого металла в электрических печах занимались Л.Л. Тир, М.Я. Столов [23]. Авторы рассмотрели движение металла в тигле, протекающее по замкнутым траекториям, как совокупность гидродинамических вихрей, возбуждаемых вихревыми зонами электромагнитных полей.

Изучением электромагнитного воздействия на металлические расплавы черных и цветных металлов занимались И.А. Чернышов [42], М.А. Мешков [62]. Вопросами практического применения и эксплуатации оборудования при электромагнитном воздействии на металлические расплавы занимаются В.С. Малиновский, А.В. Афонаскин, С.М. Нехамин, М.М. Крутянский [6, 7, 19–21, 50].

Исследованием пульсации скорости и температуры в электровихревых течениях, структуры ЭВТ ведут В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков [40, 63–68]. Они свидетельствуют о сложной трехмерной структуре электровихревых течений вблизи электродов.

В работах [69, 70] изучались вопросы по управлению ОЭМС, автор показал возможность управления интенсивностью и направлением течения расплава в ванне ДППТ за счет изменения сдвига фаз между пульсирующими токами

Моделированием ЭВТ в ДППТ занимаются А.Н. Семко и О.В. Казак (Донецкий национальный университет), они разработали методику управления электровихревыми течениями в ДППТ, позволяющую уменьшить износ футеровки в области подового электрода [71, 72].

Течение электропроводной жидкости в магнитных и электрических полях наиболее изучено в магнитогидродинамических устройствах и электромагнитных насосах для перекачивания жидких металлов [73, 74], но роль электромагнитных полей и их применение в электрометаллургии недостаточно освещено даже в периодических изданиях, а перечень экспериментальных и теоретических работ относительно невелик.

Сегодня выплавку металла ведут в ДППТ как с одним, так и с двумя подовыми электродами и даже с четырьмя ПЭ, но при этом остаются нерешенными вопросы по выбору количества подовых электродов в печи, их рациональному размещению на подине, размерам, а также влияния на поведение образующихся ЭВТ и возникающих при этом объемных электромагнитных сил.

Из анализа литературных источников установлено, что в ванне ДППТ более перспективными являются технологии электровихревого и кондукционного перемешивания металла. Однако их использование ограничено, так как недостаточно полно изучены вопросы, связанные с конструкцией индукторов, используемых для кондукционного перемешивания, конструктивных параметров подовых электродов и токовых режимов через них при электровихревом перемешивании. На основании этого сформулированы цель работы и задачи исследования.

Цель работы: повышение эффективности электровихревого и кондукционного перемешивания расплава металла под действием объемных электромагнитных сил в

ванне дуговой печи постоянного тока за счет выбора рациональных конструктивных и технологических параметров.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить влияние интенсивности движения расплава на динамику нагрева и плавления куска ферромарганца;
- посредством компьютерного моделирования изучить поведение напряженности магнитного поля и объемных электромагнитных сил в жидкой ванне при разной конструкции токоподводов к подовому электроду, выбрать рациональные конструкции внешних индукторов, используемых при кондукционном перемешивании;
- посредством компьютерного моделирования определить влияние конструктивных параметров для одного или двух подовых электродов, токов протекающих через них, на собственное магнитное поле и объемные электромагнитные силы в ванне расплава ДППТ. Найти параметры и технологические режимы, повышающие эффективность электровихревого перемешивания расплава и разработать практические рекомендации;
- на физической модели исследовать характер течения токонесущего расплава в жидкой ванне при воздействии на него объемных электромагнитных сил, возникающих под действием внешних и собственных магнитных полей;
- найти параметры конструкции ДППТ малой вместимости, повышающие эффективность электровихревого и кондукционного перемешивания жидкой ванны.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ ФЕРРОМАРГАНЦА И ПОВЕДЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОБЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В ВАННЕ С ТОКОНЕСУЩИМ РАСПЛАВОМ

В настоящее время невозможно представить технологический процесс получения качественного металла без процесса перемешивания. Электромагнитное перемешивание в ванне ДППТ появляется в результате образования ОЭМС, возникающих при взаимодействии: внешнего магнитного поля и токов, протекающих между электродами через расплав (кондукционный способ перемешивания); собственных магнитных полей и токов, протекающих между одним или несколькими электродами (электровихревой способ перемешивания).

Кондукционное и электровихревое перемешивание оказывает существенное влияние не только на протекание тепломассообменных процессов и перемешивание расплава, но и на качество выплавляемого металла.

Движение металла в жидкой ванне в значительной мере определяется электромагнитным полем, которое возникает при протекании токов в результате размещения электродов на подине. С его помощью возможно управление движением металла благодаря ОЭМС, которые действуют со стороны этого поля на металл. Расплав из приповерхностного слоя с более высокой температурой ОЭМС переносится вниз, где проявляются Архимедовы силы. По мере движения расплава вниз теплопроводность уменьшает тепловую неоднородность.

Недостаточно изучено как влияют конструктивные параметры и местоположение подовых электродов в ванне ДППТ на процессы электровихревого перемешивания, проходящие в жидкой ванне.

Однако исследование особенностей процессов перемешивания металла непосредственно на промышленных объектах крайне затруднительно в силу целого ряда организационно-технических причин, главными из которых являются высокие температурные режимы и непрозрачная среда в металлургических агрегатах, вызывающие сложность визуального наблюдения. Об этом сообщают многие авторы (Зубарев А.Г., Ефименко С.П., Пилюшенко В.П., Сизов А.М., Дюдкин Д.А. и др.) [24, 33, 75, 76]. Получение экспериментальных данных о процессах, происходящих в ванне вы-

сокотемпературного расплава, имеет существенные ограничения вследствие технологической сложности прямых измерений исследуемых параметров в агрессивной среде жидкого металла. Поэтому основным способом исследования процессов перемешивания металлургических расплавов является изучение с помощью физических и математических моделей.

В современных условиях развития электросталеплавильного производства остро стоит вопрос экономии легирующих и раскисляющих материалов, которые предназначены для придания стали специальных свойств и снижения содержания кислорода в расплаве металла до требуемых значений, в зависимости от выплавляемой марки стали. В качестве легирующих и раскисляющих материалов могут использоваться чистые металлы (никель, алюминий, медь и др.) и ферросплавы, сплавы (силико-кальций, силикомарганец и др.). При попадании в высокотемпературную сталеплавильную ванну куски ферросплавов слипаются в большие комки, которые, оседая на дно ванны, не успевают полностью раствориться. Процесс расплавления может начаться в период слива металла в ковш, а при последующем химическом анализе возможно непопадание в заданную марку стали. Поэтому актуальным вопросом является процесс полного растворения добавочных материалов и при их минимальном расходе. Решение данной проблемы возможно при интенсивном перемешивании легирующих и раскисляющих материалов.

В данной главе проанализируем тепловое состояние элементарного куска ферромарганца, динамику его нагрева и плавления, а также рассмотрим поведение внешнего и собственного магнитных полей вблизи токоподводов различной конфигурации при кондукционном и электровихревом перемешивании, распределение электромагнитных параметров и ОЭМС в ванне ДППТ в зависимости от тока и конструктивных параметров подовых электродов.

2.1. Технология выплавки стали 110Г13Л

В данном разделе проанализируем тепловое состояние элементарного куска ферромарганца, динамику его нагрева и плавления.

Высокомарганцевая сталь отличается необычно высоким содержанием фосфора до 0,12% (таблица 2.1). При выплавке стали 110Г13Л применяются два метода плавки: метод переплава и с окислением на свежей шихте [77, 78].

Таблица 2.1 — Химический состав стали 110Г13Л, %

По британскому стандарту BS1457:1957 [79]				
C	Si	Mn	S	P
1,0—1,35	до 1,0	более 11,0	до 0,006	до 0,1
По ГОСТ 21357–87 [80, 81]				
0,90–1,40	0,30–1,00	11,50–15,00	0,05	0,12

Для дефосфорации в завалку подают до 3,0% железорудного материала и извести соответственно. Проводится форсированное окисление (до 30 мин), которое оканчивается при содержании углерода около 0,1% и фосфора – не более 0,02%. Окислительный шлак скачивается и наводится восстановительный. В металл в два-три приема вводится ферромарганец и одновременно осуществляется диффузионное раскисление шлака мелким коксиком и порошком ферросилиция. Шлак должен иметь вид белого порошка, а содержание закиси железа и марганца перед выпуском не должно быть больше 1 и 3% соответственно. Конечное раскисление стали проводится присадкой 0,05% алюминия. Продолжительность восстановительного периода составляет 1 ч.

Выплавка стали 110Г13Л в ОАО «Курганмашзавод» ведется в ДППТ-5АГ номинальной емкостью 5 т с основной футеровкой. После выпуска плавки проводят подготовку печи к следующей плавке. Подину и откосы очищают от шлака, поврежденные места заправляют огнеупорной массой, которая состоит на 92–96% из магнезитового порошка или магнезитового порошка и на 4–8% из жидкого стекла. Огнеупорная масса наносится слоями не более 12–20 мм. В зону ПЭ загружают шихту, состоящую из 30 % собственного возвратного лома стали 110Г13Л и 70% марганец-содержащего лома марки Б25. Общий вес металлической садки 5,4 т. Шихту загружают следующим образом: 1/2 часть собственного возвратного лома, всю навеску низкосортного отвального лома, плакиковый шпат, оставшуюся часть возвратного лома. При расплавлении шихтовых материалов в электродуговой печи поддерживают максимальный электрический режим, не допуская кипения ванны металла [82].

После полного расплавления шихты и прогрева ванны в течение 10–15 мин до достижения температуры металла 1400–1450°C берут первую пробу. Определив содержание кремния в металле, необходимо дать в ванну ферросилиций или силико-кальций из расчета получения 0,85–0,90% кремния в металле. По ходу плавки в печь периодически дают известняк, плакиковый шпат при густом шлаке, коксик или мел-

кий электродный бой. При необходимости берут пробу на анализ химических элементов в металле и по ее результатам проводят корректировку.

С целью предотвращения науглероживания стали при выпуске металла в ковш присадку молотого кокса или мелкого электродного боя для раскисления прекращают за 8–10 мин до выпуска. Температура металла перед выпуском должна быть 1580–1620°C.

Затем подают восьмитонный ковш под желоб электропечи с таким расчетом, чтобы струя металла попадала в зеркало металла, а не в стенку ковша или чайниковую перегородку, и производят разливку стали. В ковш подают силикокальций из расчета 1,5–2,0 кг/т и алюминий 0,9–1,1 кг/т жидкой стали. Для лучшего усвоения алюминия первые порции металла, примерно до половины высоты ковша, выпускают без шлака, для этого печь перед выпуском наклоняют в сторону сливного желоба. Металл со шлаком должен заполнять не более $7/8$ внутренней высоты ковша. При этом жидкий металл со шлаком должен находиться не менее чем на 100–150 мм от верхней кромки ковша.

Затем берут пробу на полный химический анализ. Ковш устанавливают на стенд для разливки металла и выдерживают сталь перед разливкой 5–15 мин, после чего разливают в разливочные 400–600 кг ковши. При переливе стали в малые ковши проводят дополнительное раскисление алюминием из расчета 0,3–0,5 кг/т жидкой стали, и модифицирование металла из расчета 0,1 % от массы жидкой стали. Затем заливают металл в формы.

Если состав металла по расплавлению близок к расчетному, то, не скачивая шлак, приступают к его раскислению коксиком, ферросилицием и алюминием – в зависимости от содержания в стали кремния и углерода. Восстановительный период плавки может сокращаться на 20–30 минут, за счет того, что присаживается меньше легирующих добавок, а для раскисления и десульфурации требуется меньше времени. По сравнению с плавками с окислением, производительность печи увеличивается на 20%, а расход электроэнергии уменьшается на 12–15% [5].

Выполним расчет шихты и составим материальный баланс плавки стали 110Г13Л. Состав шихты: возвратный лом – 30%, скрап (лом Б25) – 70%. Принимаем, что скрап содержит 1 % мусора, его состав 75% SiO_2 и 25 % Al_2O_3 , а возвратный лом содержит 1 % окалины в виде Fe_3O_4 (Fe_2O_3 – 69%, FeO – 31%). Химический состав шихты показан в таблицах 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Состав металлической части шихты, %

Элемент	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Ti	Al
Возврат	1,40	14,50	1,00	0,12	0,05	1,00	1,00			
Лом Б25		10,1		0,035		12,0	2,5			
FeMn 75	7,00	70	6,00	0,02						
FeSi 75		0,47	75	0,03	0,03	0,2				2,0

Балансовый расчет выполнен по методике, разработанной на кафедре металлургии черных металлов Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова [83, 84].

Таблица 2.3 – Состав неметаллической части шихты, %

Материал	Шлакообразующие, %										
	CaO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaF ₂	S	CO ₂	Σ
Известь	85	2,4		1	0	0	1,5	0	0,1	10	100
Плавленый шпат	2	4,5							0,1	93,4	100
Зола кокса	4,5	42,5		23		28,5	1,5				100
Магнезитовый порошок	2,1	1,8		0,6			94,9			0,6	100
Твердый окислитель	1	7,99	0,36	3,05	9	79,6					100

Состав шлака по расплавлению приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Состав шлака по расплавлению, %

Оксиды	CaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	S	FeO	Fe ₂ O ₃
%	45,64	21,37	0,87	16,27	2,75	2,00	0,10	8,00	11,00
кг	3,6205	1,6954	0,0693	1,2909	0,2182	0,1588	0,0077	0,6346	0,2380

Материальный баланс периода расплавления показан в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Материальный баланс периода расплавления

Задано	кг	Получено	кг
Отвальный лом	70	Металл	95,8122
Возврат	30	Конечный шлак	7,9332
Кислород атмосферы	0,6362	Летучие:	
		CO	0,058
		CO ₂	0,5252
Известь	4,2569	Пыль	0,6645
Магнезитовый порошок	0,1		
Итого	104,9931	Итого	104,9931

В таблице 2.6 приведен угар и усвоение элементов ферромарганца.

Таблица 2.6 – Угар и усвоение элементов ФМн

Элемент	Количество элементов в ФМн, кг		
	Всего	Окисляется	Остается в металле
C	0,0681	0,0353	0,034
Si	0,058	0,029	0,0303
Mn	0,651	0,0065	0,636
P	0,0002		0,0002
Fe	0,2118		0,2137
Итого	01,0191	0,06986	0,9492

Состав готовой стали:

$$[C]_{zom} = 1,272 + 0,035 = 1,31; [Si]_{zom} = 0,029; [Mn]_{zom} = 11,59 + 0,65 = 12,24;$$

$$[P]_{zom} = 0,0119 + 0,0002 = 0,0124 [S]_{zom} = 0,0053.$$

Важным моментом плавки является процесс усвоения ферросплавов при проведении легирования металла, который занимает продолжительное время. Для сокращения времени усвоения лигатур можно применить магнитогидродинамическое перемешивание, выравнивающее температурное поле и химический состав по объему ванны, а также влияющее на другие технологические процессы. Далее рассмотрим нагрев и плавление кусков ферромарганца.

2.1.1. Математическая постановка задачи плавления ферромарганца с учетом движения жидкого металла

Объектом моделирования является жидкая ванна ДППТ-5. Предметом исследования - процессы расплавления твердых кусков ФМн75 в жидкой сталеплавильной ванне с учетом их обтекания жидким металлом со скоростью W_T и температурой t_{T0} [136].

При создании математической модели приняты следующие допущения:

- между сталью и ферромарганцем нет химических реакций с выделением или поглощением теплоты;
- куски ферромарганца имеют сферическую форму;
- процессом «намерзания» и расплавления корочки можно пренебречь из-за относительно небольшого времени протекания этих процессов;
- в сферической системе координат, связанной с центром шарового тела (ШТ), имеем осесимметричное температурное поле. Кусок ферромарганца в виде ШТ

участвует в теплообменных процессах с расплавом;

- тепло внутри ШТ распространяется только за счет теплопроводности, не учитывается влияние вынужденной и свободной конвекции;
- теплофизические свойства твердой, жидкой фазы стального тела постоянные;
- при взаимодействии ферромарганца с расплавом не выделяется и не поглощается тепло.

Исходные данные при моделировании процесса взаимодействия ФМн75 с жидким расплавом металла.

I. Технологические и геометрические параметры процесса

Эквивалентный диаметр ШТ ферромарганца	$d=2r_0=40-100$ мм;
Температура жидкой стали	$t_{т0}=1380^0$ С;
Начальная температура кусков ферромарганца	$t_{м0}=20^0$ С;
Скорость движения стали вблизи ШТ [20, 85]	$W_{ст}=0-0,34$ м/с;

II. Теплофизические свойства ферромарганца [86]

Средний химический состав ферромарганца приведен в таблице 2.7.

Таблица 2.7– Химический состав ФМн75 [87]

Элемент	C	Mn	Si	S	P
Содержание, масс. %	7,0	70,0	6,0	0,03	0,03

Плотность жидкого ферромарганца	$\rho_{мж}=6372$ кг/м ³ .
Кажущаяся плотность твердого ферромарганца	$\rho_{мт}=6970$ кг/м ³ .
Удельная теплоемкость жидкого ферромарганца	$c_{мж}=747$ Дж/(кг К).
Удельная теплоемкость затвердевшего ферромарганца	$c_{мт}=651$ Дж/(кг К).
Коэффициент теплопроводности жидкого ферромарганца	$\lambda_{мж}=24$ Вт/(м К).
Коэффициент теплопроводности затвердевшего ферромарганца	$\lambda_{мт}=20$ Вт/(м К).
Теплота плавления ферромарганца	$L=286$ кДж/кг.

III. Теплофизические свойства жидкой стали (сталь 110Г13Л)

Температура ликвидуса	$t_{тпл}=1331^0$ С.
Плотность жидкой стали	$\rho_{т}=7000$ кг/м ³ .
Удельная теплоемкость жидкой стали	$c_{т}=653,172$ Дж/(кг К).
Коэффициент теплопроводности жидкой стали	$\lambda_{т}=46,5$ Вт/(м К).

Коэффициент кинематической вязкости жидкой стали $\nu_T = 8,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Теплота плавления

$$L_T = 265 \text{ кДж/кг.}$$

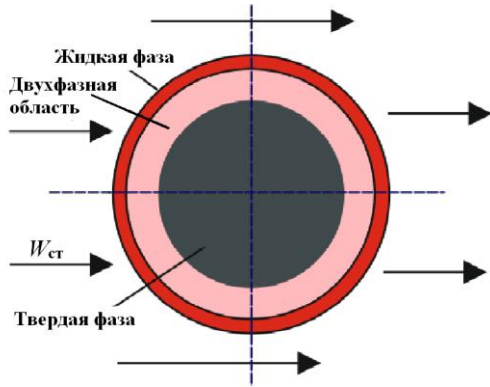


Рисунок 2.1 – Нагрев и плавление шарообразного тела ферромарганца при его обтекании жидкой сталью

Процесс взаимодействия шарообразного тела ферромарганца с движущимся расплавом представлен на рисунке 2.1. Считаем, что удаление жидкой фазы ферромарганца происходит по мере его расплавления.

С учетом принятых допущений и ограничений температурное поле в ШТ описывается одномерным уравнением теплопроводности в сферической системе координат ($\partial T/\partial \psi = 0$, $\partial T/\partial \theta = 0$) с учетом выделения тепла кристаллизации [88].

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} - \rho L \frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где τ – время; $T(r, \tau)$ – температура металла, g – доля твердой фазы, причем доля жидкой фазы $S = 1 - g$.

Используя подстановку $\frac{\partial g}{\partial \tau} = \frac{\partial g}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau}$, это уравнение примет следующий вид:

$$c_{эф}\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial \lambda}{\partial r} + \frac{2\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (2.1)$$

На основе допущения о постоянстве теплофизических свойств твердой, жидкой фазы стального тела и учитывая, что $\lambda_{мж} \approx \lambda_{мт}$, можно принять $\partial \lambda / \partial r = 0$ и упростить уравнение (2.1)

$$c_{эф}\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.2)$$

В полученном уравнении коэффициент теплопроводности

$$\lambda(r, T) = \begin{cases} \lambda_{мж}, & \text{при } T > t_{млик}; \\ \lambda_{мт}g + \lambda_{мж}(1-g), & \text{при } t_{мсол} \leq T \leq t_{млик}; \\ \lambda_{мт}, & \text{при } T < t_{мсол}; \end{cases} \quad (2.3)$$

плотность металла

$$\rho(r, T) = \begin{cases} \rho_{\text{МЖ}}, & \text{при } T > t_{\text{Млик}}; \\ \rho_{\text{МТ}}g + \rho_{\text{МЖ}}(1-g), & \text{при } t_{\text{Мсол}} \leq T \leq t_{\text{Млик}}; \\ \rho_{\text{МТ}}, & \text{при } T < t_{\text{Мсол}} \end{cases} \quad (2.4)$$

и эффективный коэффициент теплоемкости

$$c_{\text{эф}}(r, T) = \begin{cases} c_{\text{МЖ}}, & \text{при } T > t_{\text{Млик}}; \\ c_{\text{МТ}}g + c_{\text{МЖ}}(1-g) - L \frac{dg}{dT}, & \text{при } t_{\text{Мсол}} \leq T \leq t_{\text{Млик}}, \\ c_{\text{МТ}}, & \text{при } T < t_{\text{Мсол}}. \end{cases} \quad (2.5)$$

Для решения тепловой задачи количество твердой фазы в интервале затвердевания будем определять по линейному закону [89]:

$$g = \frac{t_{\text{Млик}} - T}{t_{\text{Млик}} - t_{\text{Мсол}}}, \quad (2.6)$$

где $t_{\text{Млик}}$, $t_{\text{Мсол}}$ - температуры ликвидуса и солидуса соответственно, которые, в свою очередь, зависят от среднего химического состава ферромарганца.

Для решения дифференциального уравнения (2.2) необходимо дополнить его начальным и граничными условиями.

Начальные условия

Начальная температура ШТ при $\tau=0$
 для $0 \leq r \leq r_0$ $T(r, 0) = t_{\text{М0}}.$ (2.7)

Граничные условия

В центре ШТ (условие осевой симметрии при $r=0$)

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (2.8)$$

На границе ШТ и жидкой стали (граничное условие 3 рода)

$$\lambda \frac{\partial T(r_{\xi}, \tau)}{\partial r} = \alpha(t_{\text{т0}} - T(r_{\xi}, \tau)), \quad (2.9)$$

где α - коэффициент теплоотдачи от жидкой стали к ШТ; r_{ξ} - координата жидкой и межфазной области, где $T = t_{\text{Млик}}$ ($g(r, \tau)=0$).

Коэффициент теплоотдачи α для одиночного шара определяется по эмпирической формуле [89]

$$Nu_l = 2 + 0,03Pr^{0,33}Re^{0,51} + 0,35Pr^{0,35}Re^{0,58}, \quad (2.10)$$

где $Re = \frac{2r_{\xi} \cdot W_T}{\nu_T}$; $Nu_1 = \frac{2r_{\xi} \cdot \alpha}{\lambda_T}$, $Pr = \frac{v_T c_T \rho_T}{\lambda_T}$.

2.1.2. Результаты компьютерного моделирования нагрева и плавления кусков ферромарганца в жидкой стали

Проведено исследование изменения размера куска ферромарганца от момента попадания его в расплав до полного расплавления (при $d=60$ мм). Установлено, что наибольшее время требуется при полном отсутствии перемешивания металла ($W_{ст}=0$). Уже при относительно небольшой скорости течения металла $W_{ст}=0,1$ мм/с в ванне ДППТ время расплавления заметно уменьшается (рисунок 2.2, кривая 2). При существующих скоростях расплава в ванне 0,12–0,35 м/с время расплавления по сравнению с неподвижным расплавом снижается в 6–10 раз.

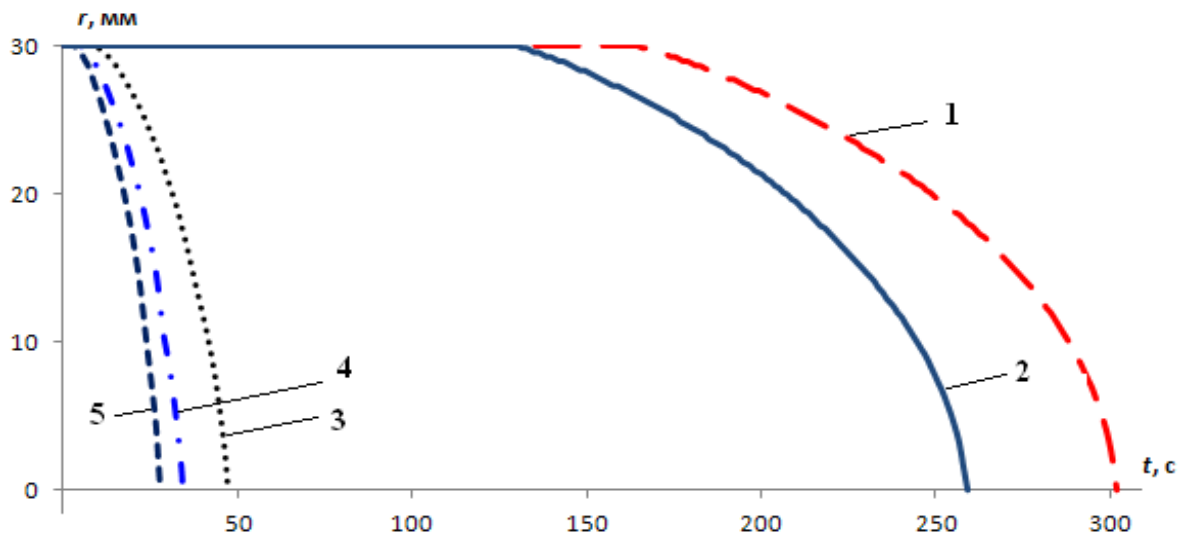


Рисунок 2.2 – Изменение радиуса ферромарганца от времени до его полного расплавления при разных скоростях $W_{ст}$, м/с: 1 – 0; 2 – 0,0001; 3 – 0,1; 4 – 0,2; 5 – 0,3

На компьютерной модели изучалось, как изменяется радиус шарового тела ФМн при попадании его в жидкометаллическую ванну до его полного расплавления в зависимости от начального радиуса (рисунок 2.3). Видно, что с уменьшением радиуса ФМн в 4 раза время расплавления снижается в 3–4 раза.

Было получено распределение температуры по радиусу шарового тела ФМн75 для разных моментов его нагрева и плавления (рисунок 2.4). Из-за сферической поверхности тепло плохо проникает вглубь ШТ ферромарганца, поэтому зависимость температуры по радиусу шара нелинейная. Градиент температуры вблизи поверхности ШТ имеет высокие значения, поэтому двухфазная зона занимает относительно небольшие размеры.

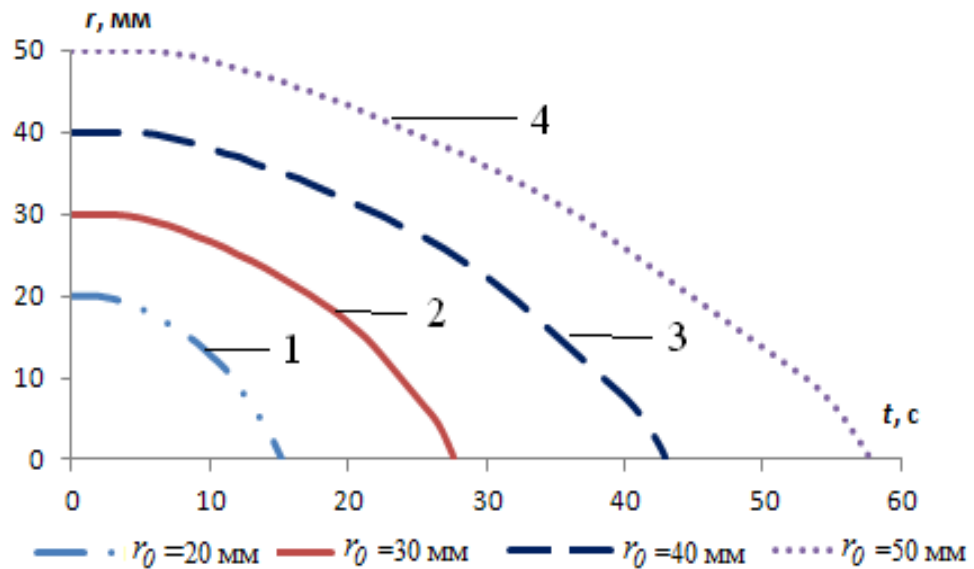


Рисунок 2.3 – Изменение радиуса куска ферромарганца от времени нахождения в жидкой стали до полного расплавления при разных начальных размерах: 1 – $r_0=20$ мм; 2 – $r_0=30$ мм; 3 – $r_0=40$ мм; 4 – $r_0=50$ мм; (при $W_{ст}=0,3$ м/с)

Таким образом, с помощью компьютерного моделирования проанализирована динамика нагрева и плавления кусков ферромарганца разного размера от скорости течения жидкого металла. Установлено, что на время расплавления кусков ферромарганца существенно влияет скорость расплава в ванне. Так, при скорости 0,1 м/с время расплавления по сравнению с неподвижным металлом снижается в 6 раз, а при скорости 0,3 м/с – в 10 раз.

2.2. Математическая модель напряженности магнитного поля вблизи токоподводов, используемых при кондукционном перемешивании металла

ДППТ – это объект, через ванну расплава которого протекают большие токи. Это приводит к образованию значительных магнитных полей как внешних, так и собственных. Для изучения движения расплава необходимо знать поведение магнитного поля. В ДППТ для подвода электрического тока могут быть использованы разные токоподводы: гибкие (при применении гибких шин) и жесткие (при применении жестких шин).

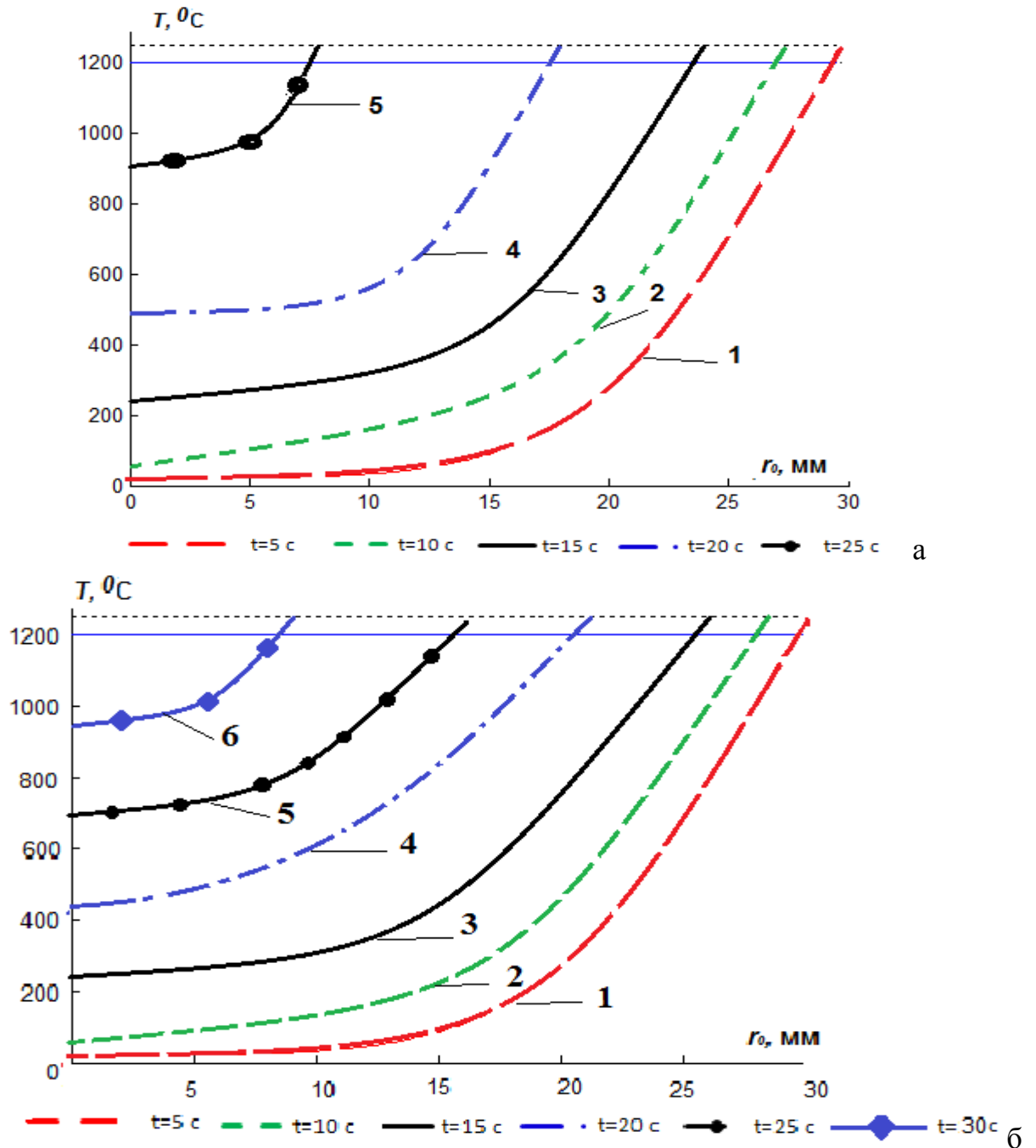


Рисунок 2.4 – Динамика изменения температуры по радиусу при $r_0=30$ мм, $t_0=1380^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{cr}}=0,3$ м/с (а) и $W_{\text{cr}}=0,3$ м/с (б), время полного расплавления 27,7 с (а) и 34,4 с (б): 1 – 5 с; 2 – 10 с; 3 – 15 с; 4 – 20 с; 5 – 25 с; 6 – 30 с

Гибкие водоохлаждаемые кабели используются при одновременном применении медных водоохлаждаемых труб токопровода с водоохлаждаемым электрододержателем, так как при этом цепи водоохлаждения короткой сети и электрододержателей можно сделать максимально удобными для обслуживания (рисунок 2.5). Однако гибкий водоохлаждаемый токопровод требует более тщательного ухода, частого осмотра и устранения утечки воды в местах соединения.

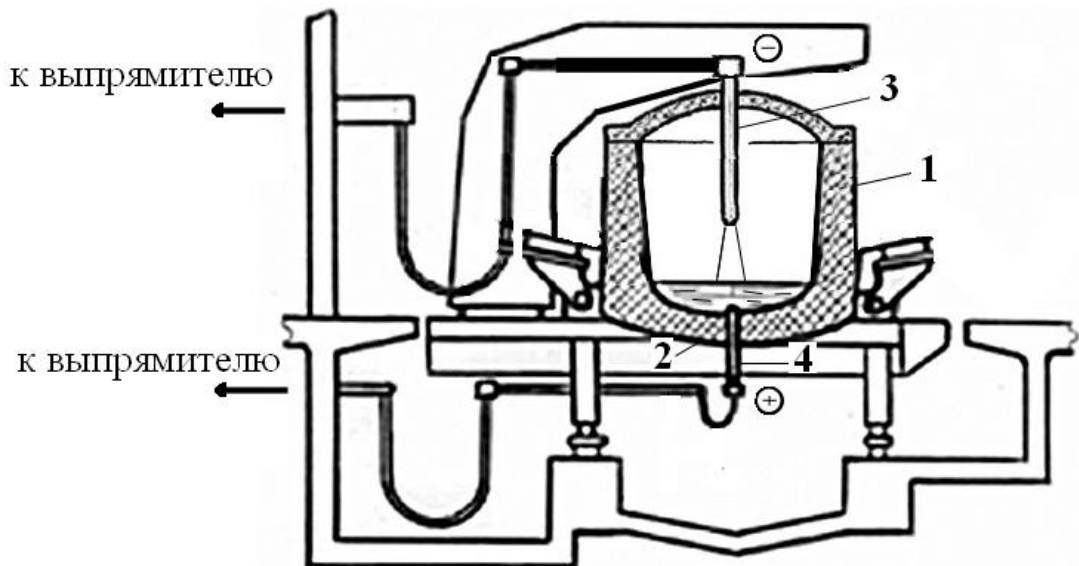


Рисунок 2.5 – Короткая сеть сталеплавильной печи: 1– корпус печи; 2 – подина печи; 3 – графитированный электрод; 4 – подовый электрод

На практике, как правило, применяются односторонние токоподводы. Элементы конструкции печи, расположенные вблизи токоведущих проводников, оказываются в области мощного магнитного поля. При больших переменных токах магнитные поля создают эффекты, которые могут затруднить нормальный технологический процесс, что приводит к дополнительным потерям энергии на перемагничивание конструкций, составляющим 20–30% от общих потерь в короткой сети. Из-за этого близко расположенные к токоведущим элементам металлические конструкции изготавливаются из дорогих немагнитных материалов.

Один из возможных способов управления процессом кондукционного перемешивания связан с изменением напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны от внешних проводников с током. Для кондукционного перемешивания расплава в ванне ДППТ предложена конструкция токоподвода к подовому электроду в виде кругового витка, плоской спирали Архимеда, цилиндрической винтовой линии или в виде пространственной спирали Архимеда (рисунок 2.6) [90, 91]. Токоподводы могут иметь один или несколько витков. Внутри винтовой линии может находиться сердечник из ферромагнитного материала, перемещая который в вертикальном и горизонтальном направлениях, можно управлять изменением величины напряженности магнитного поля в разных областях токонесущего расплава ванны, а следовательно, управлять перемешиванием.

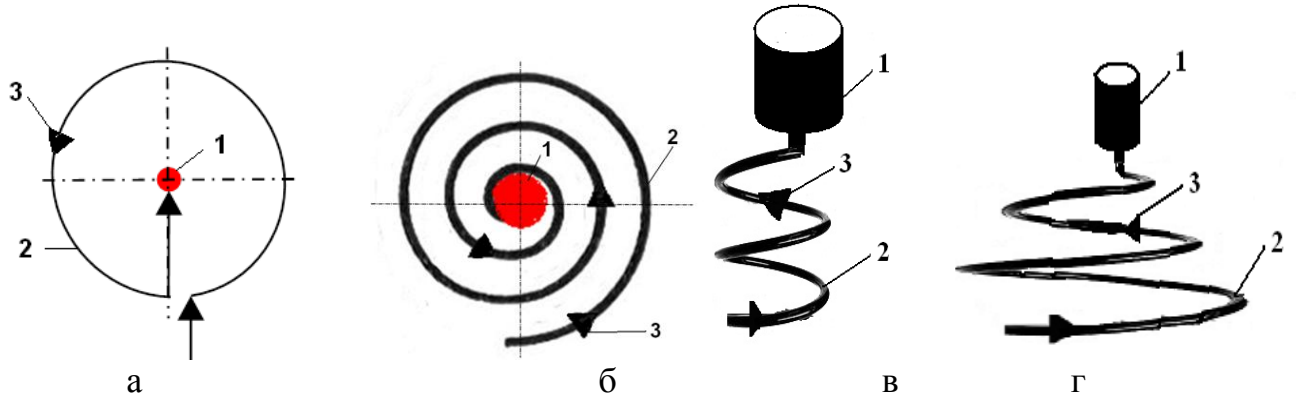


Рисунок 2.6 – Виды токоподводов к подовому электроду: а – один виток; б – плоская спираль Архимеда; в – цилиндрическая винтовая линия; г – пространственная спираль Архимеда; 1 – подовый электрод; 2 – жесткая токоподводящая шина; 3 – направление тока

Рассмотрим магнитное поле, возникающее вблизи проводника в форме цилиндрической винтовой линии, по которому протекает ток I (рисунок 2.7, а). Будем использовать цилиндрическую систему координат (r, φ, z) , связанную с декартовой (x, y, z) через соотношения $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi = \arctg(y/x)$. Зададим функцию линии проводника в параметрической форме $y(\varphi) = R_y \cdot \cos(\varphi)$, $x(\varphi) = R_y \cdot \sin(\varphi)$, $z(\varphi) = b \cdot \varphi / (2\pi)$, где b – шаг винтовой линии, определяющий изменение координаты z при увеличении φ на 2π , R_y – радиус витка. Если винтовая линия имеет n витков, то ее длина $L_\epsilon = n\sqrt{4\pi^2 R_y^2 + b^2}$.

Для определения напряженности магнитного поля в произвольной точке A от тока I , протекающего через элемент $d\vec{l}$ (точка B), воспользуемся уравнением Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^3} [d\vec{l} \times \vec{r}']. \quad (2.11)$$

Распишем координаты векторов \vec{R} , \vec{R}_y , \vec{r}' [92, 93]:

$$\vec{OB} = \vec{R} = (R_y \cdot \cos \varphi, R_y \cdot \sin \varphi, z), \quad \vec{R}_y = (R_y \cdot \cos \varphi, R_y \cdot \sin \varphi),$$

$$\vec{AB} = \vec{r}' = (R_y \cdot \cos \varphi - x_0, R_y \cdot \sin \varphi - y_0, z - z_0),$$

$$d\vec{l} = d\varphi \cdot \left(R_y \cdot \sin \varphi, -R_y \cdot \cos \varphi, \frac{b}{2 \cdot \pi} \right).$$

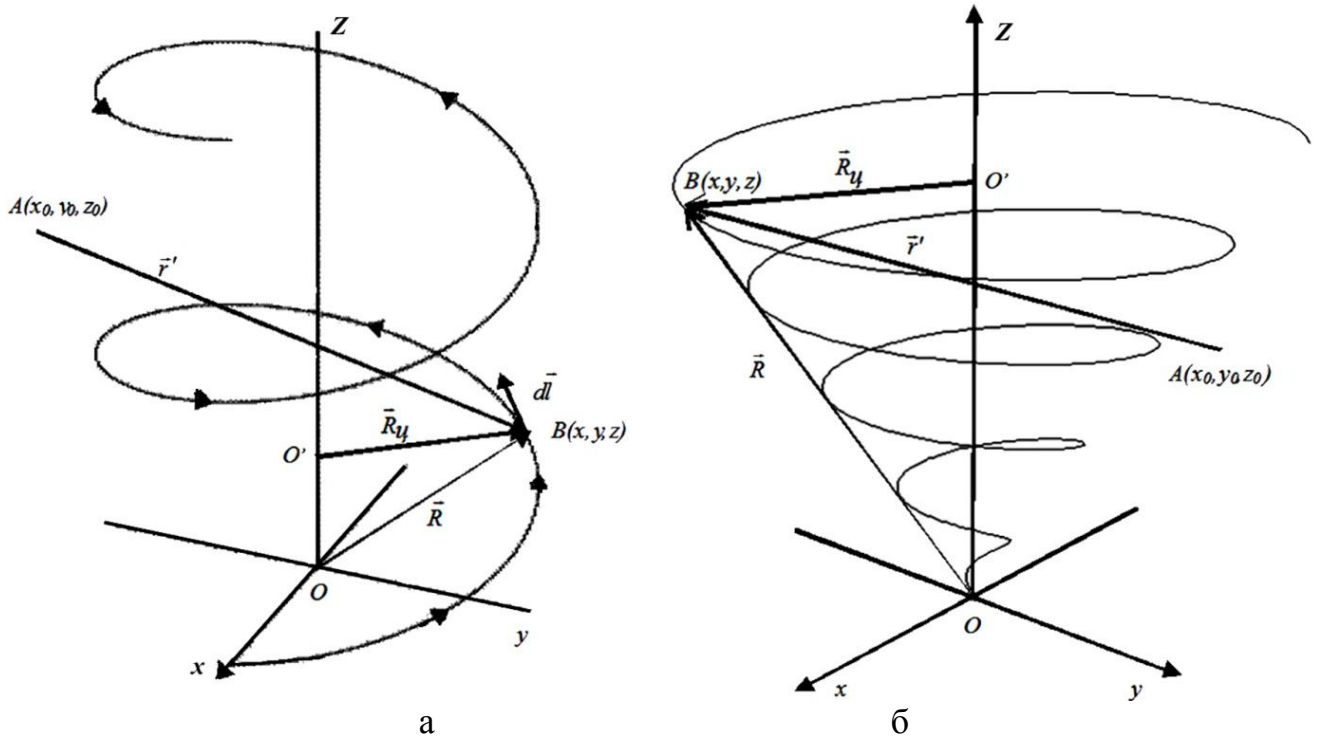


Рисунок 2.7 – К расчету напряженности магнитного поля от токоподводов, имеющих форму: а – цилиндрической винтовой линии; б – пространственной спирали Архимеда

В произвольной точке $A(r_0, \varphi_0, z_0)$, вблизи проводника с током в виде цилиндрической винтовой линии, содержащей n витков, декартовы проекции напряженности магнитного поля имеют вид

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi n} \frac{-(R_u \sin \varphi - r_0 \sin \varphi_0) \cdot b / (2\pi) - R_u \cos \varphi \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)}{\left(R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.12)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi n} \frac{(R_u \cos \varphi - r_0 \cos \varphi_0) \cdot b / (2\pi) - R_u \sin \varphi \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)}{\left(R_u^2 + r_0^2 - 2 \cdot R_u r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.13)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I \cdot R_u}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi n} \frac{R_u - r_0 \cos(\varphi - \varphi_0)}{\left(R_u^2 + r_0^2 - 2R_u r_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \left(\frac{b\varphi}{2\pi} - z_0 \right)^2 \right)^{3/2}} d\varphi. \quad (2.14)$$

В частном случае, при $b=0$, $n=1$, имеем математическую модель осесимметричного магнитного поля от кругового витка

$$H_z(r_0, z_0) = \frac{I \cdot R_y}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{R_y - r_0 \cdot \cos(\varphi)}{(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi) + z_0^2)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.15)$$

$$H_r(r_0, z_0) = \frac{I \cdot R_y \cdot z_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{(R_y^2 + r_0^2 - 2R_y \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi. \quad (2.16)$$

Рассмотрим магнитное поле, возникающее вблизи проводника в форме пространственной спирали Архимеда, по которому протекает ток I (рисунок 2.7, б). Форма такого проводника в параметрическом виде задается как $y(\varphi) = a \cdot \varphi \cdot \cos(\varphi)$, $x(\varphi) = a \cdot \varphi \cdot \sin(\varphi)$, $z(\varphi) = b \cdot \varphi / (2\pi)$, где $a = R_y / (2\pi \cdot n)$ – параметр, определяющий радиальное смещение линии и характеризующий количество витков n , которые сделает спираль для достижения внешнего радиуса $r = R_y$. Полную длину пространственной

спирали Архимеда можно определить как $L_a = \int_0^{2\pi n} \sqrt{a^2(\varphi^2 + 1) + \frac{b^2}{4\pi^2}} d\varphi$.

Распишем координаты векторов \vec{R} , \vec{r}'

$$\vec{R} = (a \cdot \varphi \cdot \cos \varphi, a \cdot \varphi \cdot \sin \varphi, z),$$

$$\vec{r}' = |\vec{AB}| = (a \cdot \varphi \cdot \cos \varphi - x_0, a \cdot \varphi \cdot \sin \varphi - y_0, z - z_0).$$

Аналогично, как и с цилиндрической винтовой линией, получаем длину вектора $|\vec{dl}| = \sqrt{dR_y^2 + dh^2 + dz^2}$, направление единичного вектора \vec{l}_e и вектор $d\vec{l}$.

В точке, заданной цилиндрическими координатами $A(r_0, \varphi_0, z_0)$, вблизи проводника в виде пространственной спирали Архимеда, содержащей n витков, проекции напряженности магнитного поля имеют вид

$$H_x(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} \frac{\lambda(\varphi) \cdot (\varphi \cdot \cos(\varphi) \cdot (z_0 - z) - (r_0 \cdot \sin \varphi_0 - a \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) \cdot b / (2\pi))}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.17)$$

$$H_y(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} \frac{\lambda(\varphi) \cdot (b / (2\pi)) \cdot ((a \cdot \varphi \cdot \cos \varphi - r_0 \cdot \cos \varphi_0) - \varphi \cdot \sin \varphi \cdot (z - z_0))}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.18)$$

$$H_z(r_0, \varphi_0, z_0) = \frac{I}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi \cdot n} \frac{\lambda(\varphi) \cdot (a \cdot \varphi^2 - r_0 \cdot \varphi \cdot \cos(\varphi - \varphi_0))}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + (z - z_0)^2)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.19)$$

$$\text{где } \lambda(\varphi) = \sqrt{\frac{4 \cdot a^2 \cdot \pi^2 + 4 \cdot a^2 \cdot \pi^2 \cdot \varphi^2 + b^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot \varphi^2 + b^2}}.$$

В частном случае, при $b=0$, можно получить математическую модель магнитного поля вблизи плоской спирали Архимеда

$$\begin{aligned} H_x(r_0, \varphi_0, z_0) &= \\ &= \frac{I \cdot a \cdot z_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{1 + \varphi^2} \cos \varphi}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi, \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} H_y(r_0, \varphi_0, z_0) &= \\ &= \frac{I \cdot a \cdot z_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{-\sqrt{1 + \varphi^2} \sin \varphi}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi, \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} H_z(r_0, \varphi_0, z_0) &= \\ &= \frac{I \cdot a}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{1 + \varphi^2} (a \cdot \varphi - r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0))}{(a^2 \cdot \varphi^2 + r_0^2 - 2a \cdot \varphi \cdot r_0 \cdot \cos(\varphi - \varphi_0) + z_0^2)^{3/2}} \cdot d\varphi. \end{aligned} \quad (2.22)$$

На основе полученной математической модели разработана программа «*Расчет магнитного поля вблизи токопроводов различной конфигурации*» (приложение Б) [94], позволяющая проводить расчеты напряженности магнитного поля вблизи проводника, выполненного в форме цилиндрической винтовой линии или пространственной спирали Архимеда (в том числе частных случаев в виде кругового витка или плоской спирали Архимеда). Ее использование позволяет определять напряженность магнитного поля в любой точке при различных геометрических параметрах проводника и силы тока, протекающего через него. Возможности созданной компьютерной программы описаны в приложении Г.

2.3. Результаты моделирования поведения магнитных полей в ванне дуговой печи постоянного тока от индукторов, используемых для кондукционного перемешивания металла

Важным технологическим преимуществом ДППТ является естественное перемешивание металла в ванне ОЭМС, возникающими за счет проходящего через жидкий расплав постоянного тока. В качестве объекта моделирования была выбрана пяти-тонная ДППТ стандартной конфигурации, основные размеры которой приведены в таблице 2.7 и на рисунке 2.8.

Таблица 2.7 – Технологические и геометрические параметры ДППТ-5, используемые для математического моделирования

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Вместимость ванны	m_0	т	5
Высота ванны	$H_в$	мм	340
Радиус ванны по жидкому металлу	$R_в$	мм	1245
Угол откоса ванны	ψ	град	33
Расстояние от оси ванны до центра подовых электродов	L	мм	0–400
Диаметр подового электрода	d_a	мм	50–600
Расстояние от оси ванны до центра первого подового электрода	X_1	мм	$0 - \frac{R_в - d_{пэ1}}{2}$
Расстояние от оси ванны до центра второго подового электрода	X_2	мм	$0 - \frac{R_в - d_{пэ2}}{2}$
Угловая координата оси первого ПЭ	φ_1	град	$\varphi_1 = 180^0$
Угловая координата оси второго ПЭ	φ_2	град	$\Delta\varphi = \varphi_1 \pm \varphi_2$
	$\Delta\varphi$	град	0–180
Ток дуги	$I_д$	кА	1–6
Средняя плотность тока в районе пятна дуги	J_n	А/мм ²	5
Диаметр пятна дуги	D_n	мм	50
Электропроводность жидкого металла	σ	(Ом·м) ⁻¹	$6 \cdot 10^5$

Посредством компьютерного моделирования изучено поведение напряженности магнитного поля в жидкой ванне при разной конструкции токоподводов к ПЭ. Проведено исследование поведения магнитного поля в ванне сталеплавильной печи ДППТ-5 стандартной конфигурации с одним ПЭ при следующих параметрах: ток дуги $I_д=6$ кА, радиус ванны по жидкому металлу $R_в = 1,245$ м, ее высота $H_в=0,34$ м.

Моделирование проводилось для плоской и пространственной спирали Архимеда, имеющей следующие параметры: $a = R_y / (2\pi \cdot n) = 0,048$ м – радиальное смещение витков спирали; $n=4$ –количество витков, которые сделает спираль для достижения внешнего радиуса $R_y=1,2$ м; $b=-0,3$ м – шаг винтовой линии; $L_a \approx 15,3$ м – длина пространственной спирали. Для токоподвода, выполненного в виде одного витка и цилиндрической винтовой линии, моделирование проводилось для тех же значений R_y , b , n , при этом длина винтовой линии составляла $L_в \approx 30,2$ м. Все токоподводы располагались на расстоянии $z_д=0,3$ м от плоскости верхнего витка до подины ванны, контактирующей с жидким металлом [96–98].

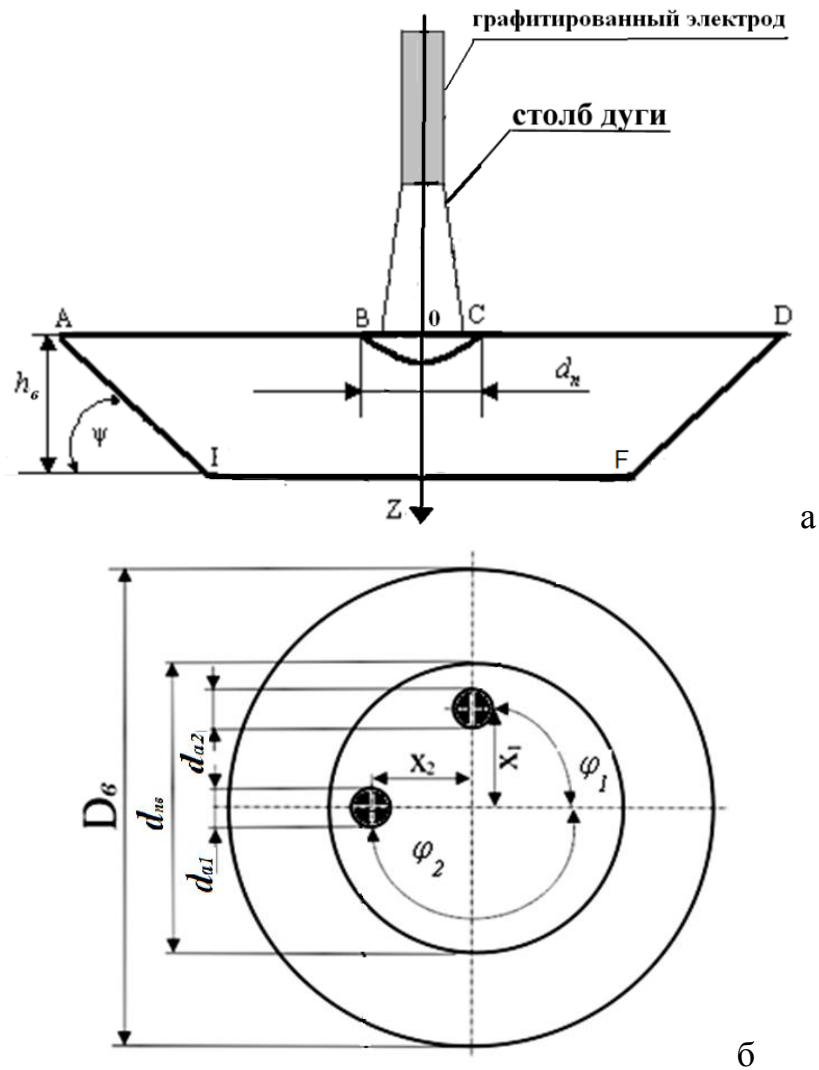


Рисунок 2.8 – Основные размеры ванны: а – вид подины сбоку; б – вид подины сверху; BC – область взаимодействия дуги с ванной расплава; AD – поверхность расплава металла; IF – подина; D_6 – диаметр ванны; d_{ns} – диаметр подины; d_n – диаметр пятна дуги; h – высота ванны; ψ – угол откоса ванны; d_{a1} – диаметр первого ПЭ; d_{a2} – диаметр второго ПЭ; X_1 – расстояние от центра подины до оси первого ПЭ; X_2 – расстояние от центра подины до оси второго ПЭ; φ_1 – угловая координата первого ПЭ; φ_2 – угловая координата второго ПЭ [99]

При моделировании принималось, что ванна с расплавом находится в положительном полупространстве ($z > 0$) относительно xOy , а шина токоподвода располагается в отрицательном полупространстве ($z < 0$). Подина ванны, контактирующая с жидким металлом, расположена на расстоянии $z = 0,3$ м. Построены графики изменения осевой и радиальной составляющих напряженности магнитного поля в разных областях ванны при разной форме токоподвода. При этом учитывалось влияние магнитного поля только от токоподвода.

Изучены зависимости осевой H_z и радиальной H_r проекций напряженности маг-

нитного поля по координате r на подине, на середине ванны по ее высоте и на ее свободной поверхности (рисунок 2.9). Установлено, что осевая и радиальная проекции напряженности магнитного поля имеют один порядок, при этом при приближении к краю витков ($r \rightarrow R_{\text{ц}}$) величина H_z снижается, а H_r возрастает. С увеличением расстояния z от токоподвода значения напряженностей магнитного поля снижаются.

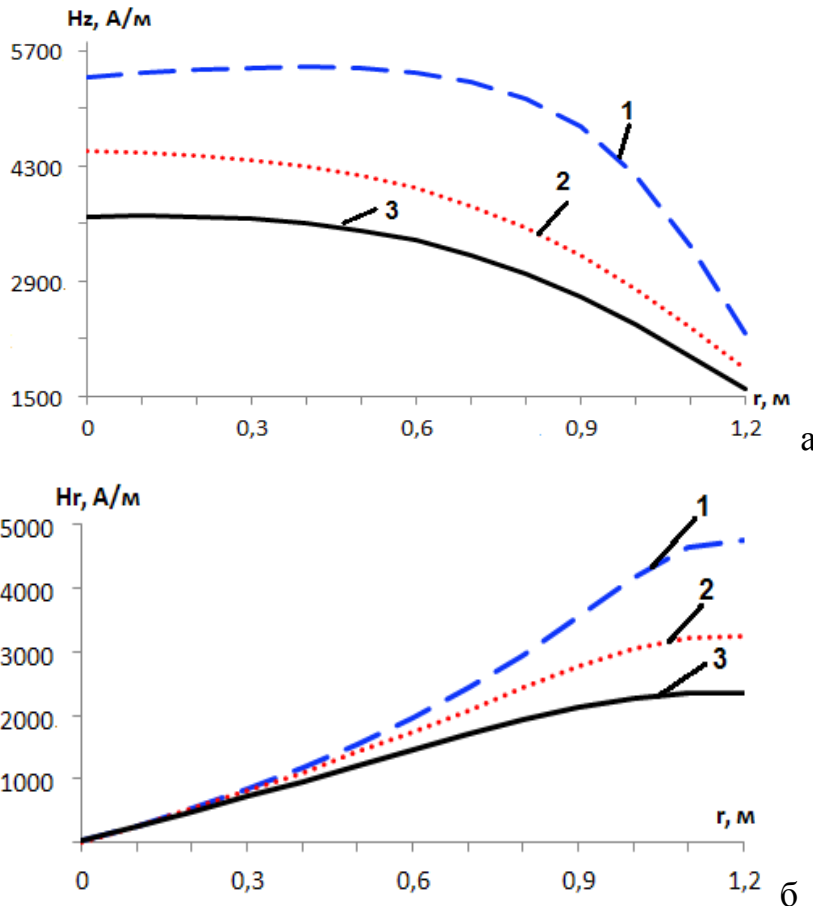


Рисунок 2.9 –
Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля по радиусу ванны для $\varphi = \pi/3$, создаваемых цилиндрической винтовой линией: 1 – на подине ванны ($z = 0,3$ м); 2 – на середине ванны по ее высоте ($z = z_0 + H_0/2$); 3 – на свободной поверхности ванны ($z = z_0 + H_0$)

Проанализированы зависимости осевой H_z и радиальной H_r проекции напряженности магнитного поля для токоподвода, выполненного в виде пространственной спирали Архимеда, по координате r (рисунок 2.10).

Выяснено, что с возрастанием расстояния z от токоподвода значение напряженности магнитного поля снижается для обеих проекций. Кроме того, радиальная составляющая магнитного поля для пространственной спирали Архимеда вдоль координаты r имеет экстремум (рисунок 2.10, б).

Для токоподвода в виде цилиндрической винтовой линии проекция напряженности магнитного поля H_z при движении по координате r сначала практически не меняется до $r/R_{\text{ц}} < 0,5$, а затем наблюдается ее резкое снижение (рисунок 2.9, а). Для токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда для величины осевой напряженности

магнитного поля это снижение имеет плавный характер (рисунок 2.10, а). H_z в обоих случаях имеет один порядок. С увеличением значений координаты r для цилиндрической винтовой линии наблюдаем плавный рост величины H_r (рисунок 2.9, б), а для пространственной спирали Архимеда – максимальное значение поля (рисунок 2.10, б).

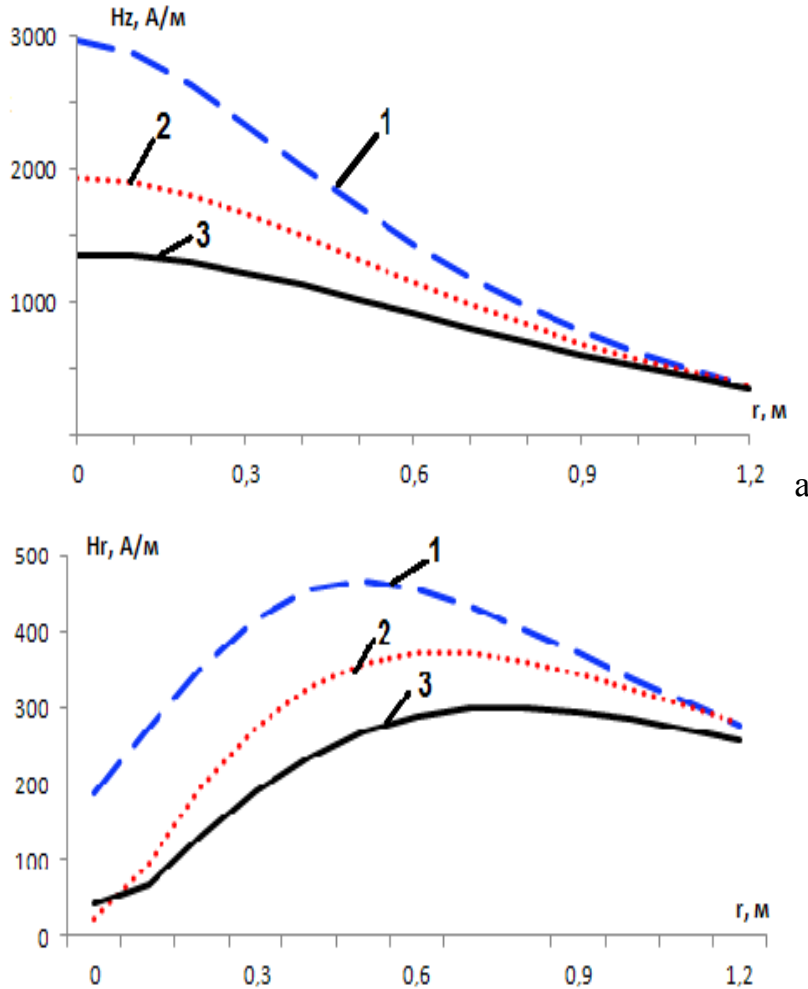


Рисунок 2.10 – Зависимости осевой (а) и радиальной (б) проекций напряженности магнитного поля по радиусу ванны, создаваемых пространственной спиралью Архимеда (при $\varphi = \pi/3$): 1 – на подине ванны ($z = 0,3$ м); 2 – на середине ванны по ее высоте ($z = z_0 + H_0/2$); 3 – на свободной поверхности ванны ($z = z_0 + H_0$)

Изучены зависимости осевой и радиальной проекций напряженностей магнитного поля от координаты r , создаваемых токоподводом в виде плоской спирали Архимеда (рисунок 2.11). Проекции H_z и H_r имеют величины одного порядка. При этом значение H_z имеет максимальные величины на оси. Для H_r , как и для пространственной спирали Архимеда, наблюдается максимальное значение поля при движении от оси ванны к периферии.

При сравнении пространственной и плоской спиралей Архимеда получено, что зависимость радиальной (H_r) проекции напряженности магнитного поля от координаты r имеет схожий вид, но для плоской спирали Архимеда величина H_r существенно больше (рисунок 2.11). С увеличением расстояния от подины ванны до ее свободной поверхности значения H_r снижаются примерно в 4 раза.

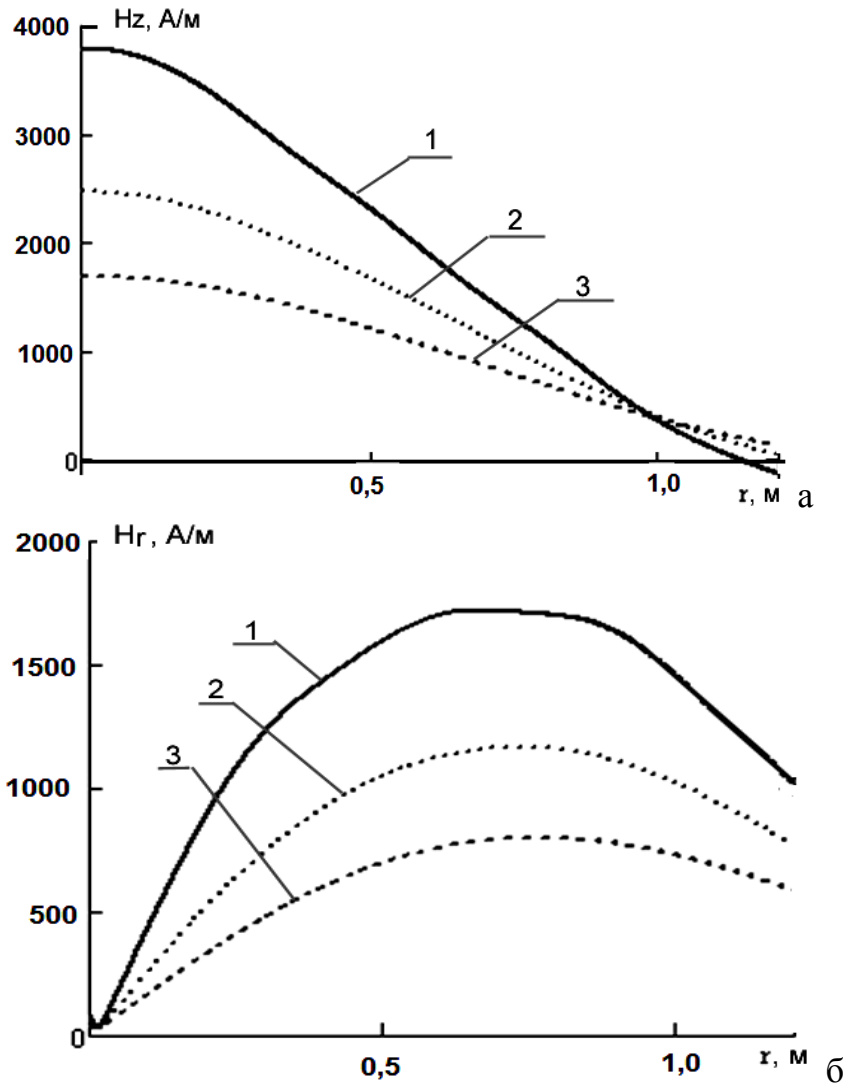


Рисунок 2.11 –
Зависимости
осевой (а) и
радиальной (б)
проекций
напряженности
магнитного поля
от координаты r ,
создаваемых
токоподводом в
виде плоской
спирали
Архимеда (в): 1 –
на подине ванны
($z=0,3$ м); 2 – на
середине ванны
по ее высоте
($z=z_0+H_8/2$);
3 – на свободной
поверхности
ванны ($z=z_0+H_8$)

Плоская спираль Архимеда является более перспективной, чем пространственная, так как при прочих равных условиях при компактной форме она обеспечивает высокие значения всех проекций напряженности магнитного поля в обрабатываемом расплаве металла.

Получена зависимость осевой проекции напряженности магнитного поля от числа витков для токоподводов в форме цилиндрической винтовой линии и пространственной спирали Архимеда на середине ванны по высоте $z=z_0+H_8/2$. Установлено, что с увеличением числа витков для токоподвода в форме цилиндрической винтовой линии осевая проекция напряженности магнитного поля H_z плавно возрастает и достигает насыщения при 5-6 витках (рисунок 2.12).

Для токоподвода в форме пространственной спирали Архимеда величина H_z в два раза меньше, чем для токоподвода в форме цилиндрической винтовой линии, и имеет максимальное значение при 2–4 витках.

Из всех рассмотренных форм токоподводов магнитное поле имеет осевую сим-

метрию только вблизи кругового витка (при $b=0$, $n=1$). Получена зависимость радиальной проекции магнитного поля H_r от азимутальной координаты φ для пространственной спирали Архимеда, при разном количестве витков на середине ванны по ее высоте (рисунок 2.13). Установлено, что с увеличением числа витков n распределение магнитного поля становится все более близким к осесимметричному. Поэтому при применении пространственных спиралей для получения поля, близкого к осесимметричному, следует использовать токоподвод с несколькими витками.

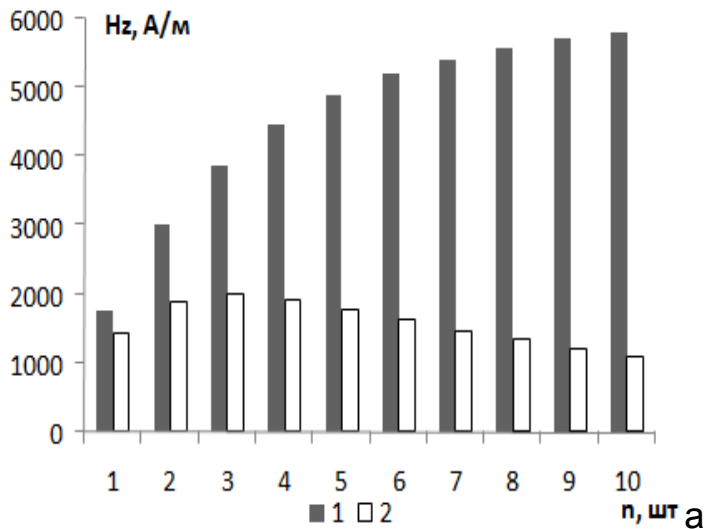


Рисунок 2.12 – Зависимость осевой напряженности магнитного поля в точке расплава металла с координатами $r=0$, $z=z_0+H_0/2$ от числа витков для токоподводов разной формы: 1 – цилиндрическая винтовая линия; 2 – пространственная спираль Архимеда

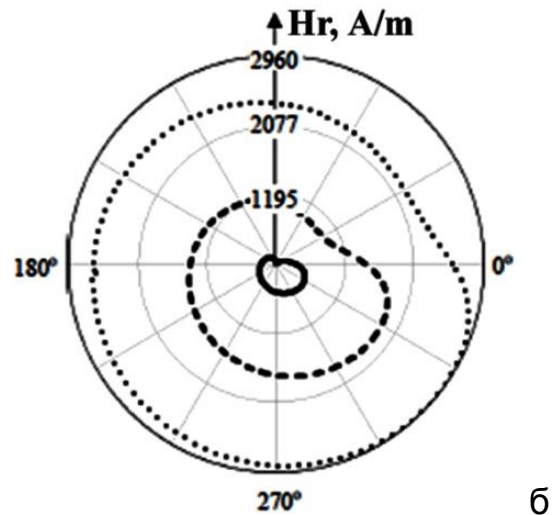


Рисунок 2.13 – Зависимость радиальной проекции напряженности магнитного поля H_r от азимутальной координаты φ при разном количестве витков n для пространственной спирали Архимеда ($r=R_y$) на середине ванны по высоте ($z=z_0+H_0/2$): — — — — — $n=3$; - - - - - $n=4$; $n=5$

Таким образом, посредством компьютерного моделирования установлено, что с увеличением количества витков токоподвода в виде пространственной спирали Архимеда наиболее рациональным является токоподвод из 2–4 витков. Для токоподвода в форме цилиндрической винтовой линии число витков не должно превышать 5–6, так как с их дальнейшим увеличением величина магнитного поля возрастает несущественно. Наиболее перспективной является конструкция токоподвода в форме плоской спирали Архимеда, так как при прочих равных условиях при компактной форме она обеспечивает высокие значения напряженности магнитного поля в обрабатываемом расплаве.

2.4. Математическая модель электромагнитных параметров и объемных электромагнитных сил, возникающих в ванне дуговой печи постоянного тока при электровихревом перемешивании металла

Электромагнитные поля в токонесущей ванне зависят от расположения и размеров подовых электродов, силы тока, параметров привязки дуги. Область расчета электромагнитных параметров определяется геометрией ванны (см. рисунок 2.8). Используется цилиндрическая система координат с началом в точке O , расположенным на поверхности ванны, ось OZ направлена вниз и совпадает с осью ванны. Полагая, что ванна дуговой печи имеет классическую форму и представляет собой усеченный конус, где h – высота ванны; d_{ne} – диаметр подины; D_e – диаметр ванны; ψ – угол откоса ванны; d_{a1} – диаметр первого подового электрода (анода); d_{a2} – диаметр подового электрода (анода); d_n – диаметр пятна дуги; φ_1 – угловая координата первого анода; φ_2 – угловая координата второго анода.

В принятой цилиндрической системе координат считаем, что первый ПЭ расположен всегда в области $\varphi_1 = 180^\circ$, а положение второго анода задается углом φ_2 , $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – угол между электродами (см. рисунок 2.11).

В работах [99–107] рассмотрены математическая модель, алгоритмы и программа «Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи», на которую получено свидетельство о гос.регистрации (приложение Б) [103].

Математическая модель распределения электрического и магнитного полей в ванне дуговой печи основывается на уравнении Лапласа для электрических потенциалов $U(r, z, \varphi)$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (2.23)$$

Граничные условия воздействия дуги на ванну определяли заданием в области пятна дуги известной плотности тока, условием равенства нулю градиента потенциала на свободной поверхности ванны и на керамических границах ее стенок. Граничные условия на поверхности подовых электродов задается условием Неймана, исходя из нормальной составляющей плотности тока.

Граничные условия на свободной поверхности ванны (при $z = 0$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, $r_n < r \leq R_g$)

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{\substack{AB \\ CD}} = 0, \quad (2.24)$$

где $r_n = \frac{d_n}{2}$ – радиус пятна дуги, если считать, что плотность пятна постоянна,

$r_n = \sqrt{\frac{I_\delta}{\pi J_n}} \frac{d_n}{2}$ – радиус пятна дуги, I_δ – ток дуги, J_n – плотность тока, которая на

анодном пятне для сталеплавильных печей составляет 0,05–1,0 А/мм² [108]. Ток дуги равен сумме токов, протекающих через подовые электроды (аноды) $I_\delta = I_{a1} + I_{a2}$.

В области пятна дуги (при $z = 0, 0 \leq \varphi < 2\pi, 0 \leq r \leq r_n$)

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{BC} = -\frac{J_n}{\sigma}, \quad U|_{BC} = 0, \quad (2.25)$$

где σ – удельная проводимость расплава, (Ом·м)⁻¹.

На поверхностях боковых откосов ванны (при $0 \leq z \leq h_6, 0 \leq \varphi < 2\pi$) (рисунок 2.14):

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{DF} = 0, \quad \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{DF} \cos \psi + \left. \frac{\partial U}{\partial r} \right|_{DF} \sin \psi = 0, \quad r = \frac{d_6}{2} + z \cdot \operatorname{ctg} \psi, \quad (2.26)$$

где \vec{n} – нормаль к боковой поверхности ванны.

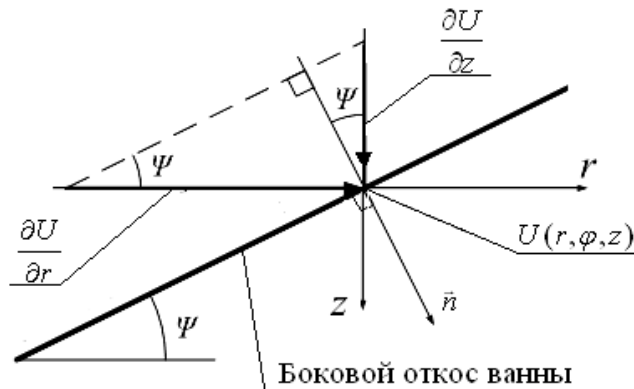


Рисунок 2.14 – Граничное условие на поверхности бокового откоса ванны

В области первого и второго подового электрода для $z = h_6$:

$$r^2 - 2rX_1 \cos(\varphi - \pi) + X_1^2 \leq R_{a1}^2; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{a1} = -\frac{J_{a1}}{\sigma}, \quad (2.27)$$

$$r^2 - 2rX_2 \cos(\varphi - \varphi_2) + X_2^2 \leq R_{a2}^2; \quad \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{a2} = -\frac{J_{a2}}{\sigma}, \quad (2.28)$$

где $R_{a1} = \frac{d_{a1}}{2}$, $R_{a2} = \frac{d_{a2}}{2}$ – радиус первого и второго подовых электродов соответственно; $J_{a1} = \frac{4I_{a1}}{\pi d_{a1}}$, $J_{a2} = \frac{4I_{a2}}{\pi d_{a2}}$ – плотность тока на поверхности первого и второго подовых электродов соответственно.

В области дна ванны (при $z = h$, $0 \leq \varphi < 2\pi$, $0 \leq r \leq \frac{d_6}{2}$):

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{IF} = 0,$$

$$r^2 - 2rX_1 \cos(\varphi - \varphi_{a1}) + X_1^2 > R_{a1}^2, \quad r^2 - 2rX_2 \cos(\varphi - \varphi_{a2}) + X_2^2 > R_{a2}^2. \quad (2.29)$$

Имея поле потенциалов $U(r, z, \varphi)$, можно определить значения градиента потенциала или напряженность электрического поля:

$$\vec{E} = -\frac{\partial U}{\partial n}, \quad E_r = -\frac{\partial U}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial U}{\partial z}, \quad E_\varphi = -\frac{\partial U}{r \partial \varphi} \quad \text{и} \quad |\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_z^2 + E_\varphi^2}. \quad (2.30)$$

Плотность тока рассчитывалась по закону Ома $\vec{J} = \sigma \vec{E} + \sigma \mu_0 \vec{W} \vec{H}$. $\vec{E} = \text{grad } U$. Максимальная скорость движения расплава в ванне печи порядка $W \approx 10^{-1}$ м/с [20, 24, 39, 86], удельная проводимость стали $\sigma \approx 10^5$ (Ом·м)⁻¹, $\mu_0 \approx 10^{-6}$ Н/А², напряженность электрического поля $E \approx 10^2$ В/м, напряженность магнитного поля $H \approx 10^2$ А/м. Таким образом, в выражении для плотности тока имеем первое слагаемое порядка 10^7 , а второе ~ 1 . Следовательно, величина $\sigma |\vec{E}| \gg \sigma \mu_0 \vec{W} \vec{H}$, поэтому сносом магнитных силовых линий за счет движения расплава можно пренебречь, а закон Ома будет иметь вид $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, соответственно для проекций плотности тока: $J_r = \sigma E_r$, $J_z = \sigma E_z$, $J_\varphi = \sigma E_\varphi$.

Для определения напряженности магнитного поля в произвольной точке A (r_0, φ_0, z_0) ванны ДППТ от тока, протекающего в точке M (r, φ, z), использовалось уравнение Био-Савара-Лапласа в дифференциальной форме [110]

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} dV, \quad (2.31)$$

где dV – элемент объема в цилиндрической системе координат; \vec{R} – радиус-вектор,

проведенный из точки M в точку A ; \vec{J} – вектор плотности тока в точке M (рисунок 2.15).

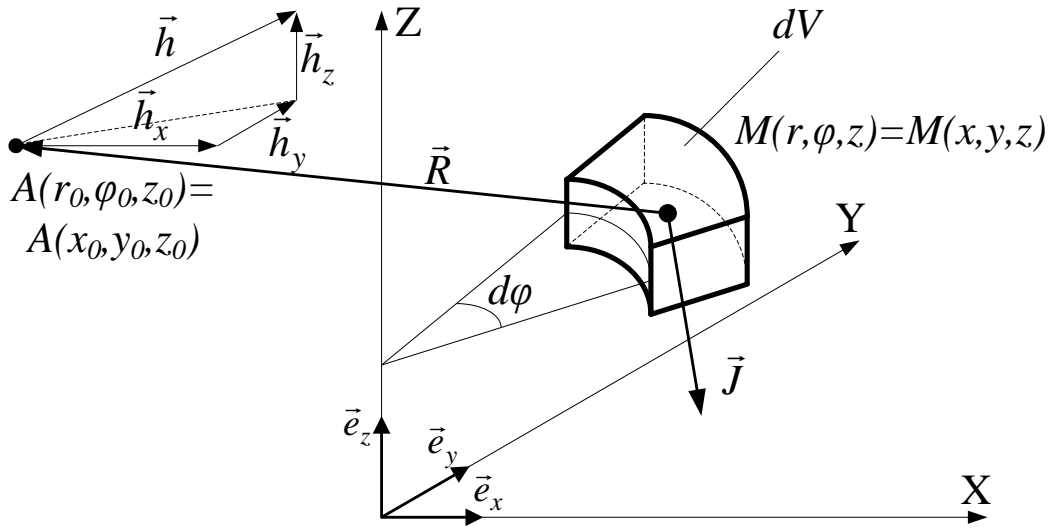


Рисунок 2.15 – К расчету напряженности магнитного поля [110]

Введем декартовую систему координат, координаты точки A (r_0, φ_0, z_0) $x_0 = r_0 \cos \varphi_0$, $y_0 = r_0 \sin \varphi_0$; а координаты точки M (r, φ, z) $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$, тогда $|\vec{R}| = \sqrt{(r \cos \varphi - r_0 \cos \varphi_0)^2 + (r \sin \varphi - r_0 \sin \varphi_0)^2 + (z - z_0)^2}$.

Спроектируем уравнение (2.31) на оси x , y , z и проинтегрируем по всему объему ванны (ось z совпадает с осью ванны и направлена от ее свободной поверхности). Получим проекции напряженности магнитного поля в точке A

$$H_x = \frac{1}{4\pi} \int_0^{R_g} \int_0^{2\pi} \int_0^{H_g} [(J_r \sin \varphi + \chi J_\varphi \cos \varphi)(z_0 - z) - J_z (r_0 \sin \varphi_0 - r \sin \varphi)] \cdot \eta_x \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz; \quad (2.32)$$

$$H_y = \frac{1}{4\pi} \int_0^{R_g} \int_0^{2\pi} \int_0^{H_g} [(J_z (r_0 \cos \varphi_0 - r \cos \varphi) - (J_r \cos \varphi - \chi J_\varphi \sin \varphi)(z_0 - z)] \cdot \eta \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz; \quad (2.33)$$

$$H_z = \frac{1}{4\pi} \int_0^{R_g} \int_0^{2\pi} \int_0^{H_g} [(J_r \cos \varphi - \chi J_\varphi \sin \varphi)(r_0 \sin \varphi_0 - r \sin \varphi) - (J_r \sin \varphi + \chi J_\varphi \cos \varphi)(r_0 \cos \varphi_0 - r \cos \varphi)] \cdot \eta \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz, \quad (2.34)$$

где $\chi = \begin{cases} 1 & \text{для I и III координатной плоскости;} \\ -1 & \text{для II и IV координатной плоскости;} \end{cases}$ $\eta = \frac{r}{|\vec{R}|}$;

В цилиндрической системе координат равенство (2.34) дает нам осевую проекцию H_z вектора \vec{H} , а равенства $H_r = H_y \sin \varphi_0 - H_x \cos \varphi_0$; $H_\varphi = H_y \cos \varphi_0 - H_x \sin \varphi_0$ – его радиальную и азимутальную проекции соответственно.

По значениям векторов напряженностей электрического и магнитного полей в ванне можно определить объемную электромагнитную силу как

$$\vec{f} = [\vec{J} \times \vec{B}] = \mu_0 \sigma [\vec{H} \times \vec{E}]. \quad (2.35)$$

На основе рассмотренной модели создана компьютерная программа «Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи» (приложение Б) [103], позволяющая проводить компьютерное моделирование распределения поля потенциалов, напряженности электрического и магнитного полей, распределения объемных электромагнитных сил в ванне ДППТ с изменением конструктивных и технологических параметров объекта исследования.

Подробно математическая модель, алгоритм расчета и возможности моделирования программного продукта рассмотрены в работах [105–107]. Возможности программы описаны в приложении В.

2.5. Моделирование поведения напряженности магнитного поля от токонесущего расплава в ванне дуговой печи постоянного тока

2.5.1. Поведение напряженности магнитного поля

при одном подовом электроде

Интенсивность электровихревых течений зависит от величины тока, проходящего через расплав, от места расположения ПЭ и его диаметра.

Рассмотрим варианты, когда в ванне ДППТ размещен один подовый электрод. Расчеты проведены для следующих параметров: ток дуги $I_d = 6$ кА, диаметр подового электрода 300 мм для случаев, когда:

- 1) ось подового электрода совпадает с осью ванны ($L = 0$);
- 2) ось подового электрода не совпадает с осью ванны ($L = 400$ мм).

При растекании тока по ванне между пятном дуги и ПЭ существуют три проекции напряженности магнитного поля, причем наиболее значительной среди них является азимутальная составляющая. В работе [111] было доказано, что при размещении ПЭ по центру ванны осевая и радиальная проекции напряженности магнитного поля отсут-

ствуют $H_r = H_z = 0$. Значение магнитного поля и его проекций в каждой точке ванны пропорциональны току дуги.

Получены диаграммы распределения азимутальной проекции магнитного поля для ванны с одним ПЭ, размещенным на оси ванны (рисунок 2.16). Проекция азимутальной напряженности магнитного поля H_φ имеет максимальные значения на краях пятна дуги и подового электрода и минимальные – на оси ванны и ПЭ и на боковых стенках. Наблюдается осевая симметрия. При этом величина H_φ имеет отрицательные значения, а изолинии с одинаковой напряженностью практически вертикальны.

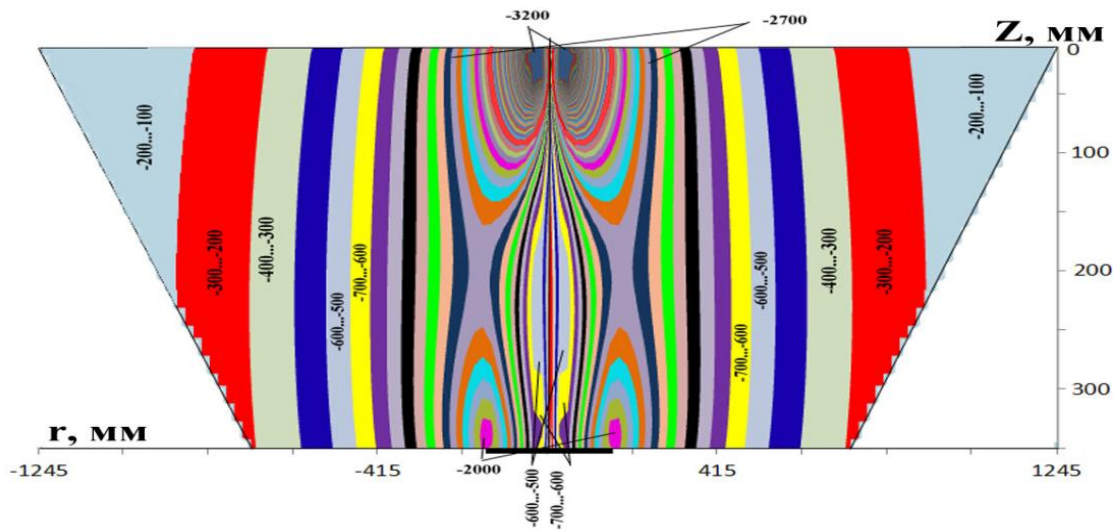


Рисунок 2.16 – Распределение азимутальной проекции напряженности магнитного поля H_φ в плоскости, проходящей через ось ванны и ось ПЭ; цифры показывают значение H_φ , А/м ($I_d = 6$ кА)

Получены диаграммы распределения азимутальной, осевой и радиальной проекций магнитного поля в плоскости, проходящей через ось ванны и ось ПЭ (рисунок 2.17). Установлено, что если смотреть на ванну со стороны зеркала металла, то H_φ направлено против хода часовой стрелки (рисунок 2.17, а) и меняет знак в области между осью ванны и ПЭ, что объясняется особенностями выбора цилиндрической системы координат, а также тем, что проекцию азимутальной составляющей магнитного поля создает вертикальная составляющая плотности тока J_z , которая максимальна в области ПЭ.

Изучено распределение осевой проекции напряженности магнитного поля H_z в плоскости, которая проходит через ось ванны и ось ПЭ (рисунок 2.17, б). Можно отметить, что H_z максимальна в области между ПЭ и пятном дуги, имеет практически вер-

тикальные линии с одинаковыми значениями и, изменяясь от оси ванны по радиусу в сторону оси ПЭ, меняет свое значение на противоположное за подовым электродом. Направление H_z формируется азимутальной и радиальной составляющими плотностями тока J_φ и J_r , которые в области подового электрода меняют свое направление.

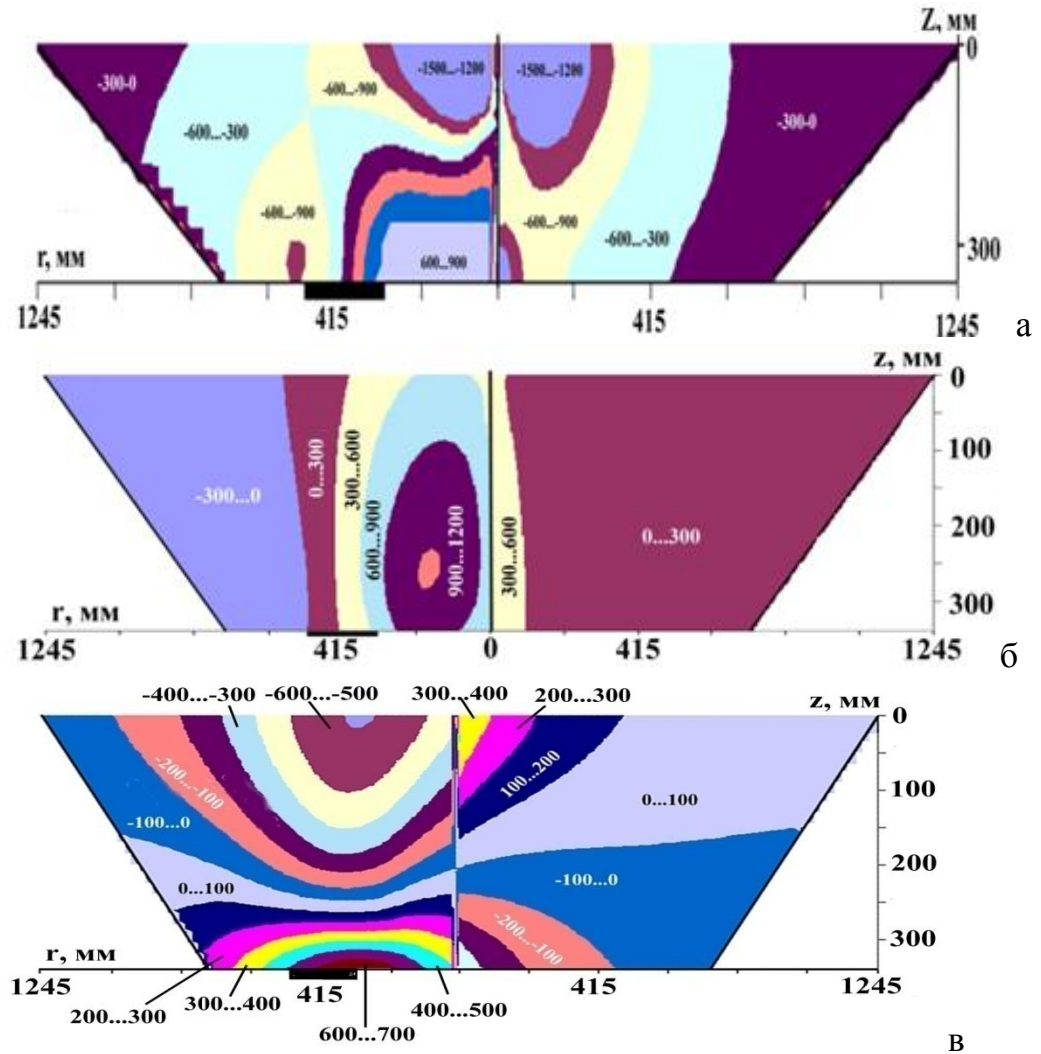


Рисунок 2.17 – Распределение проекций напряженности магнитного поля в плоскости, проходящей через ось ванны и ось ПЭ; цифры показывают значение напряженности магнитного поля, А/м: а – азимутальная проекция H_φ ; б – осевая проекция H_z ; в – радиальная проекция H_r .

Установлено, что радиальная проекция магнитного поля H_r тоже знакопеременна, это происходит на расстоянии $z=(2/3)H_g$ от поверхности ванны (рисунок 2.17, в).

Таким образом, установлено, что проекции напряженности магнитного поля максимальны на краях пятна дуги и подового электрода, минимальны – на осях ванны и подового электрода, а также на боковых стенках ванны. В случае смещения ПЭ от оси ванны можно наблюдать все проекции напряженности магнитного поля: ази-

мутальную H_φ , осевую H_z и радиальную H_r . Это величины одного порядка, имеющие экстремальные значения и меняющие свое направление.

2.5.2. Поведение напряженности магнитного поля при двух подовых электродах

Рассмотрим поведение магнитного поля для ДППТ с двумя подовыми электродами ($d_{a1} = d_{a2} = 300$ мм; $L_1 = L_2 = 400$ мм; $I_d = 6$ кА; $I_{a1} = I_{a2} = 3$ кА), когда ПЭ расположены на одной оси $\varphi_1 = 180^\circ$, $\varphi_2 = 0^\circ$, $\Delta\varphi = 180^\circ$ (рисунок 2.18) и когда ПЭ расположены под углом относительно друг друга $\varphi_1 = 180^\circ$, $\varphi_2 = 90^\circ$, $\Delta\varphi = 90^\circ$ (рисунок 2.19).

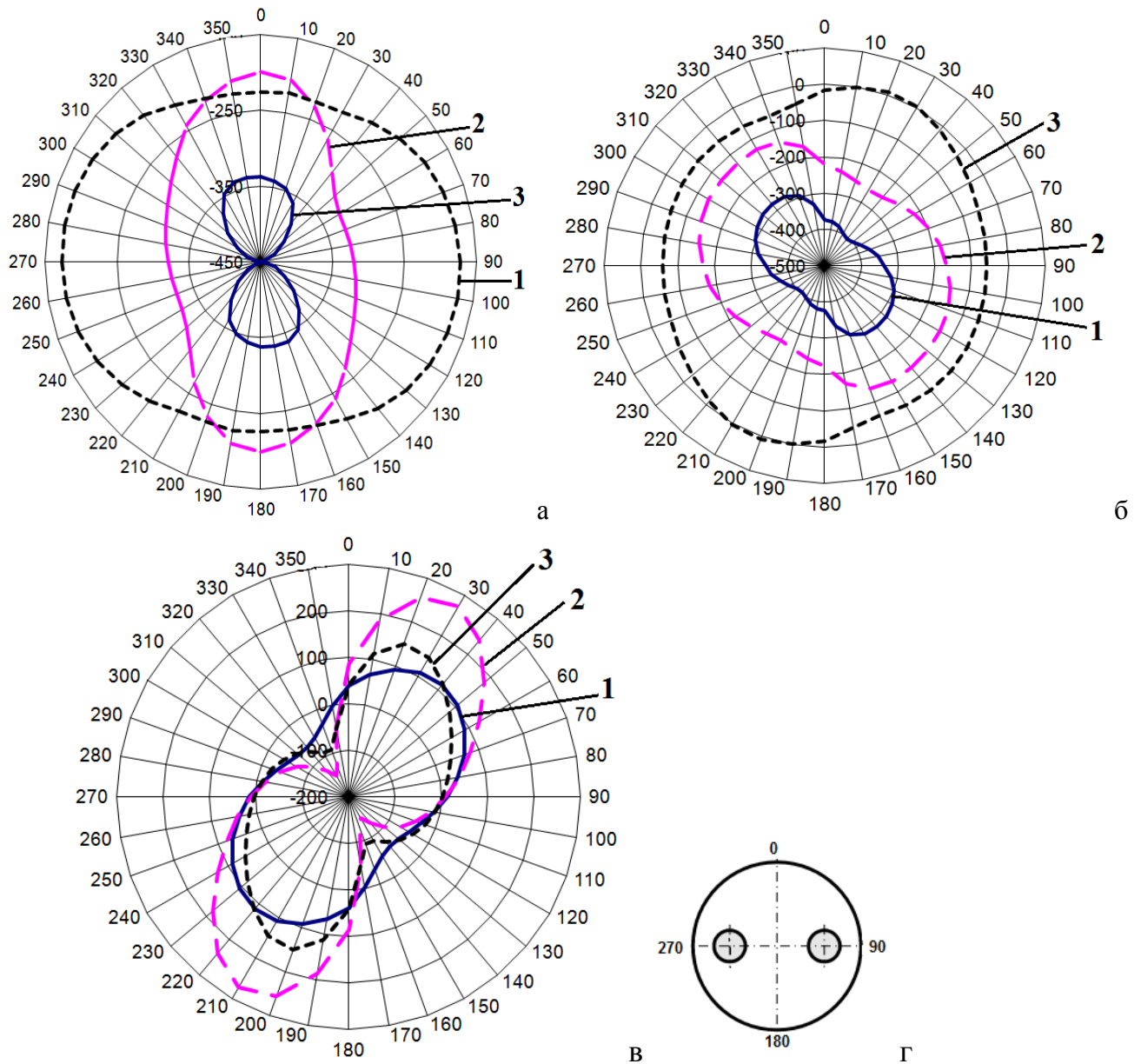


Рисунок 2.18 – Распределение азимутальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющих напряженности магнитного поля на свободной поверхности ($z=0$) на разных расстояниях от оси: 1 – $0,1R_g$; 2 – $0,25R_g$; 3 – $0,4R_g$; г – схема размещения подовых электродов

Проанализируем характер распределения $H_\varphi(\varphi)$, $H_z(\varphi)$, $H_r(\varphi)$ на свободной поверхности $z=0$ на разных расстояниях от оси ванны.

В первом случае напряженность магнитного поля имеет три составляющие: азимутальную H_φ , осевую H_z и радиальную H_r одного порядка. Для всех проекций напряженности магнитного поля наблюдается зеркальная симметрия (см. рисунки 2.18). При этом для H_z круговые диаграммы имеют практически одинаковую форму и значения. Для H_r так же как и для H_z , отмечается осевая симметрия. Величина радиальной составляющей напряженности магнитного поля на середине ванны имеет максимальные значения (см. рисунок 2.18). С увеличением расстояния от центра ванны напряженность магнитного поля падает.

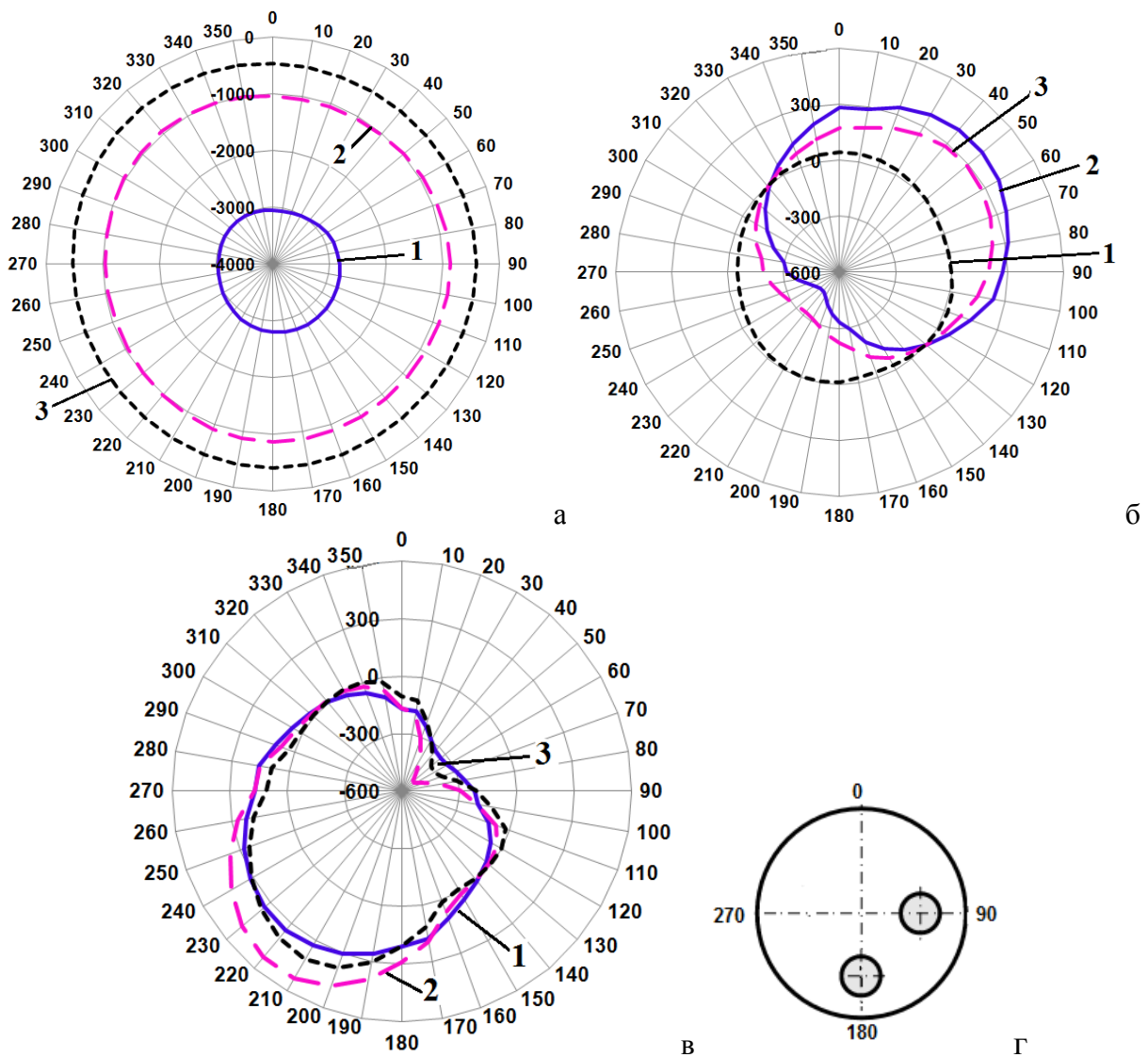


Рисунок 2.19 – Распределение азимутальной (а), осевой (б) и радиальной (в) составляющих напряженности магнитного поля на свободной поверхности ($z=0$) на разных расстояниях от оси: 1 – $0,1R_g$; 2 – $0,25R_g$; 3 – $0,4R_g$; г – схема размещения подовых электродов

Во втором случае можно отметить, что азимутальная, осевая и радиальная составляющие магнитного поля, как и в первом варианте, имеют значения одного порядка и осевую симметрию. Все три проекции меняют знак и имеют более сложное распределение (см. рисунок 2.19).

При сравнении напряженностей магнитного поля для первого и второго вариантов следует отметить, что при размещении подовых электродов по второму варианту величина напряженности магнитного поля для всех составляющих напряженности магнитного поля в 2–3 раза больше, при этом кривые охватывают большую площадь окружности для всех трех составляющих. Следовательно, в процесс перемешивания вовлекается больший объем металла, чем при использовании одного ПЭ.

Таким образом, при электровихревом перемешивании в токонесущем расплаве наблюдаются все составляющие напряженности магнитного поля (радиальная, азимутальная и осевая), которые имеют один порядок. При равенстве диаметров подовых электродов и токов, проходящих через них, магнитное поле имеет центральную симметрию.

2.6. Моделирования влияния конструктивных параметров подовых электродов на характер объемных электромагнитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока

2.6.1. Влияние положения токоподводящих электродов на течения расплава в ванне ДППТ

Определим, как ОЭМС влияют на характер течения расплава в зависимости от геометрических параметров электродов и их месторасположения на подине [112–116].

Посредством компьютерной модели по определению ОЭМС проанализировано несколько вариантов взаимного расположения катода и подового электрода (электродов). Рассмотрены следующие варианты:

- ось катода совпадает с осью ванны ($r=0$ мм):
 - 1) один ПЭ, ось которого совпадает с осью ванны (рисунок 2.20);
 - 2) два ПЭ, оси которых находятся в одной плоскости с осью ванны (угол между электродами $\Delta\varphi = 180^0$) (рисунок 2.21);
 - 3) два асимметрично расположенных ПЭ ($\Delta\varphi = 90^0$) (рисунок 2.22);
 - 4) два асимметрично расположенных ПЭ ($\Delta\varphi=120^0$) (рисунок 2.23);
- ось катода не совпадает с осью ванны ($r\neq 0$ мм):

5) ось катода смещена от оси ванны ($r = 600$ мм, $\varphi = 225^\circ$); два ПЭ ($\Delta\varphi = 90^\circ$) (рисунок 2.24).

Для всех вариантов было отмечено, что вблизи пятна дуги и области ПЭ значения составляющих ОЭМС на один – два порядка соответственно выше, чем средние значения ОЭМС по ванне (до 25 Н/м³). Анализ рисунков показал, что величина ОЭМС, возникающих в расплаве, зависит от количества ПЭ, места их размещения на подине, а также от места установки сводового электрода.

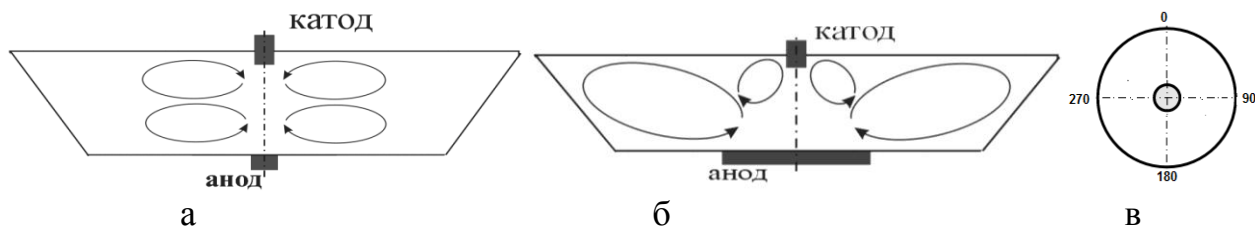


Рисунок 2.20 – Схема течения расплава для ванны с одним ПЭ, расположенного по оси ванны: а – $d_k = d_a$; б – $d_k < d_a$; в – положение подового электрода

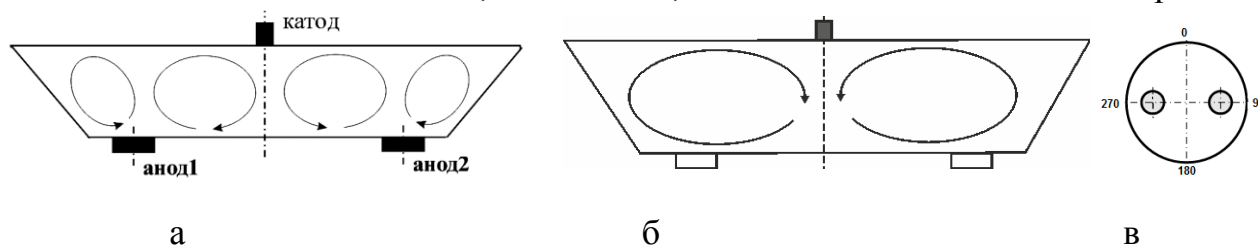


Рисунок 2.21 – Схема течения расплава для ванны с двумя подовыми электродами: а – в плоскости $0-180^\circ$, проходящей через оси подовых электродов; б – в плоскости $90-270^\circ$; в – положение подового электрода

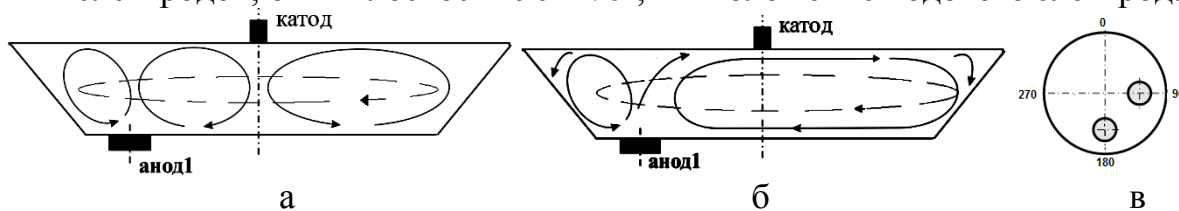


Рисунок 2.22 – Схема течения расплава для ванны с двумя ПЭ: а – в плоскости, $90-270^\circ$; б – в плоскости $45-225^\circ$; в – положение ПЭ

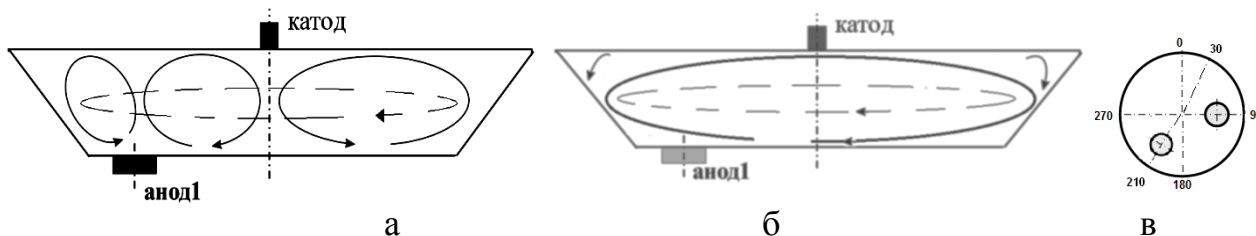


Рисунок 2.23 – Схема течения расплава для ванны с двумя ПЭ: а – в плоскости $90-270^\circ$, проходящей через ось одного из подовых электродов; б – в плоскости $45-135^\circ$; в – положение подового электрода

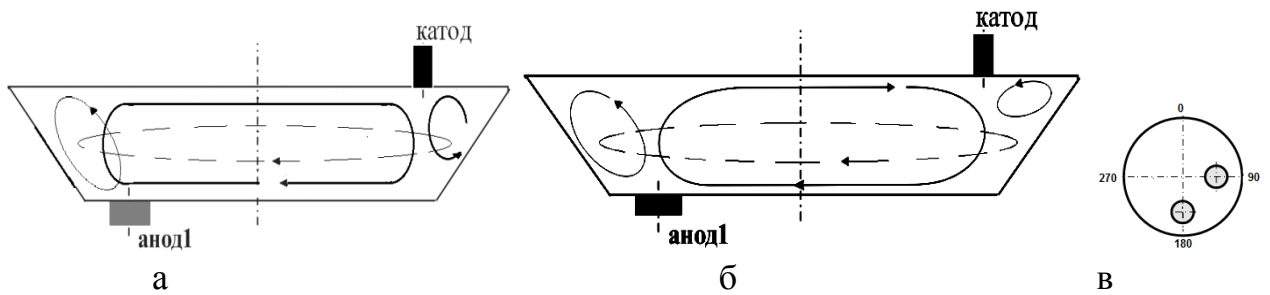


Рисунок 2.24 – Схема течения расплава для ванны с двумя ПЭ: а – в плоскости, $90-270^0$; б – в плоскости $45-225^0$; в – положение подового электрода

Для всех случаев наблюдается стягивание расплава металла к катоду и зонам размещения подовых электродов (анодов), его подъем вдоль стенок ванны и в областях, расположенных над подовыми электродами. Можно отметить наличие локальных максимумов значений ОЭМС на краях пятна дуги и краях торцевых поверхностей ПЭ, а минимумы – в центрах пятна дуги и на осях подовых электродов. Установлено, что наиболее предпочтительны подключения анодов и катода по схемам № 4 и 5, так как в этих случаях наблюдается более полное вовлечение расплава в движение по объему ванны, а возникновение застойных зон минимально. С точки зрения электровихревого перемешивания наименее выгодно подключение электродов по схеме № 1, так как в данном случае отсутствует азимутальное движение расплава.

Таким образом, смещение одного или двух ПЭ и катода от оси ванны вызывает возникновение существенных радиальных и азимутальных составляющих ОЭМС, способствующих осевому вращению расплава, что практически отсутствует в ванне ДППТ с одним центральным подовым электродом. Возникающее ЭВТ вовлекает в процесс электровихревого перемешивания больший объем расплава. На поверхности ванны радиальная составляющая ОЭМС F_r равна нулю, а азимутальная и осевая составляющие сил не зависят от координаты φ (см. рисунок 2.25). Наиболее существенной является осевая проекция ОЭМС.

На подине печи все силы сконцентрированы в области подовых электродов, причем вертикальные и радиальные компоненты сил в районе токоподводов максимальны у краев подового электрода, а на его оси эти силы равны нулю (см. рисунок 2.26). Все проекции ОЭМС имеют одно направление за исключением области около подового электрода. В объеме расплава проекции ОЭМС при движении от оси к периферии ванны имеют экстремум на расстоянии от 0 до $1/2R_g$.

2.6.2. Влияние токов, протекающих через подовые электроды, на объемные электромагнитные силы в ванне ДППТ

При работе реальной печи в режиме перемешивания ее тепловую мощность поддерживают постоянной. При фиксированной длине дуги это возможно, если при изменении токов через подовые электроды суммарный ток будет оставаться постоянным $I_{a1} + I_{a2} = const$.

Рассмотрим поведение ОЭМС для ДППТ с двумя ПЭ ($d_{a1} = d_{a2} = 300$ мм; $L_1 = L_2 = 400$ мм; $\varphi_1 = 0^\circ$, $\varphi_2 = 180^\circ$, $\Delta\varphi = 180^\circ$; $I_d = 6$ кА). Радиус пятна дуги $r_n = \sqrt{I_d / \pi J_n}$. Рассмотрим вариант равенства токов, протекающих через подовые электроды $I_{a1} = I_{a2} = 3$ кА, что соответствует плотности тока, проходящего через них $J_{a1} = J_{a2} = \frac{4I_{a1}}{\pi d_a^2} = 4,25$ А/см². В этом случае существует определенная симметрия распределения токов через две плоскости симметрии, одна из них проходит через оси подовых электродов, другая – перпендикулярна первой, проходит через ось ванны.

Результаты моделирования распределения азимутальной F_φ , осевой F_z и радиальной F_r , составляющих ОЭМС по координате r приведены на рисунках 2.25–2.26.

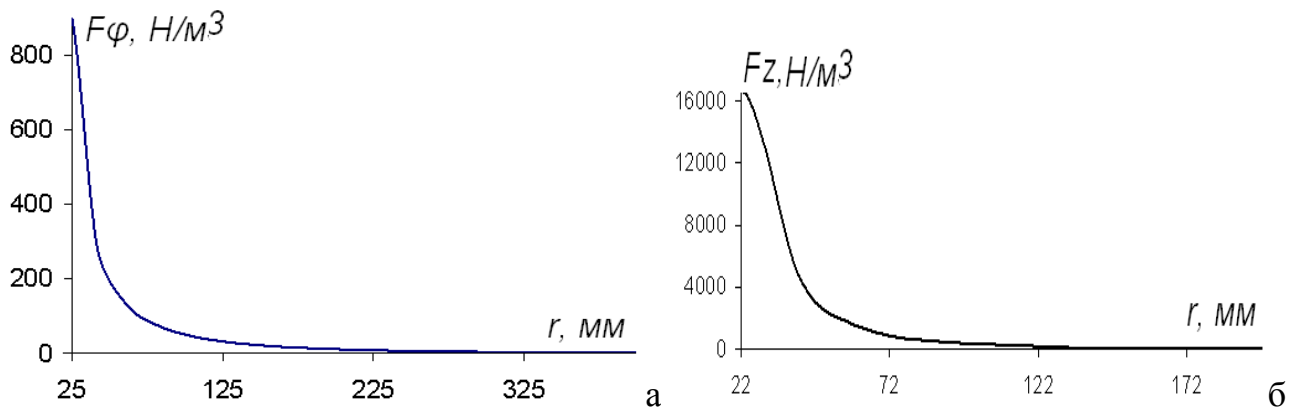
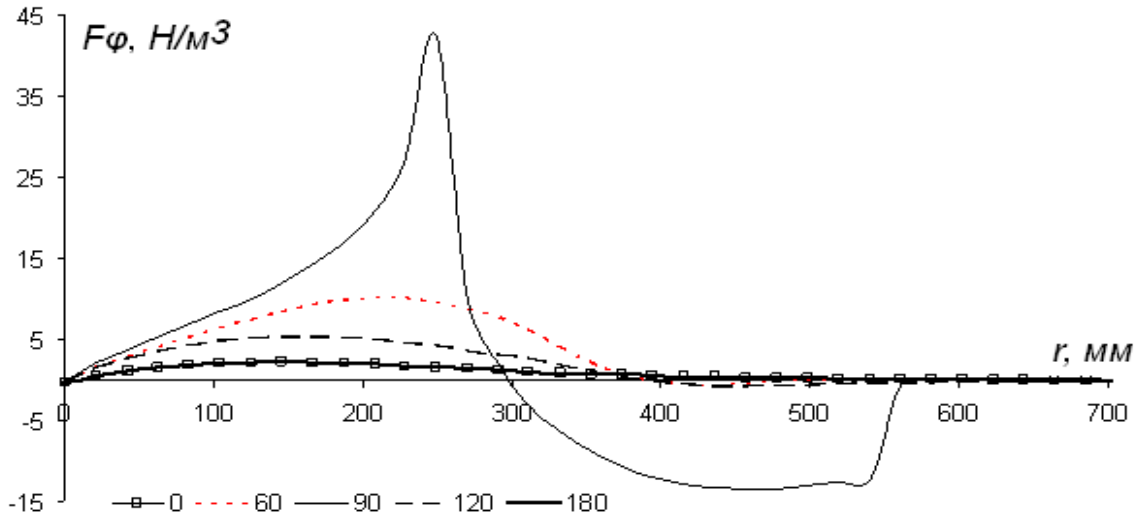
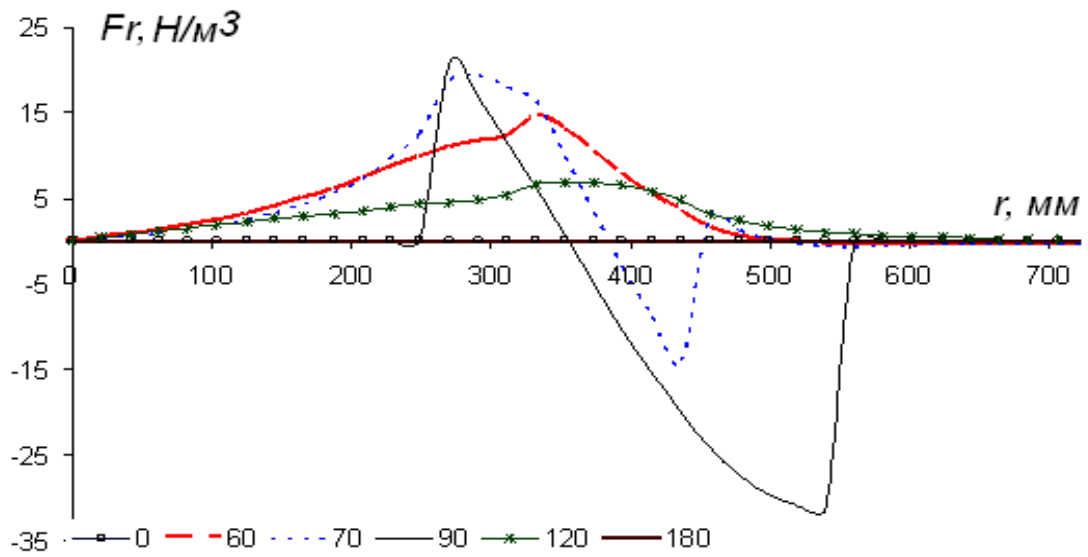


Рисунок 2.25 – Распределение азимутальной F_φ (а) и осевой F_z (б) составляющих ОЭМС по радиусу ванны при $I_{a1} = I_{a2} = 3,0$ кА на поверхности ванны, $Z / H_B = 0$

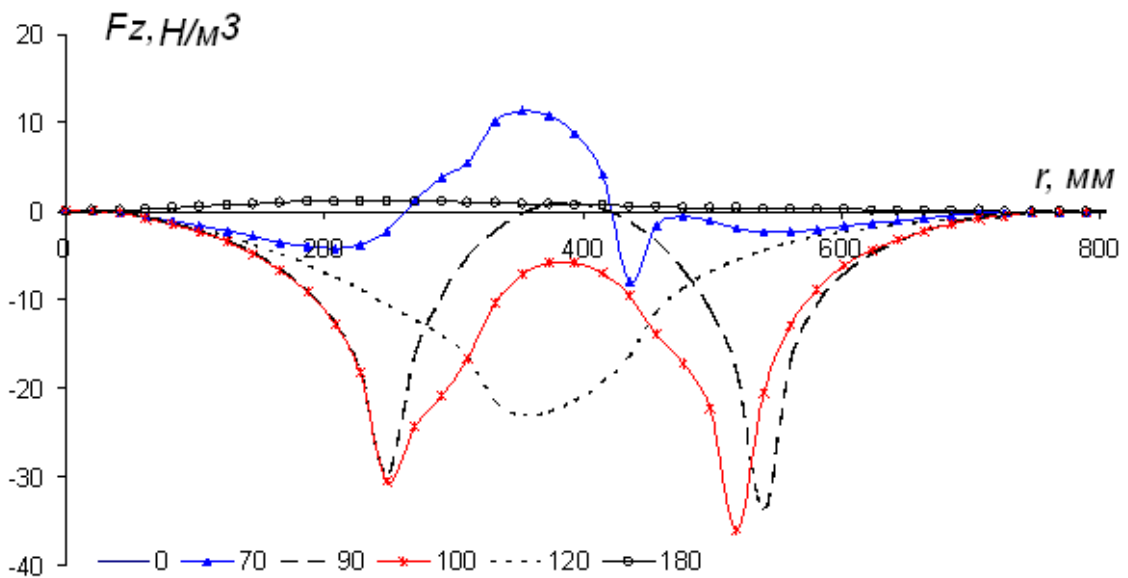
Зададим асимметрию токов через подовые аноды $I_{a1} = 2$ кА, $I_{a2} = 4$ кА ($J_{a1} = 1,59$ А/см², $J_{a2} = 3,18$ А/см²). В этом случае наблюдается трехмерное несимметричное распределение токов и ОЭМС (рисунки 2.27–2.28).



а



б



в

Рисунок 2.26 – Распределение азимутальной F_φ (а), радиальной F_r (б) и осевой F_z (в) составляющих ОЭМС по радиусу ванны при различных углах φ при $I_{a1} = I_{a2} = 3$ кА на подине ванны, $Z/H_e = 1$

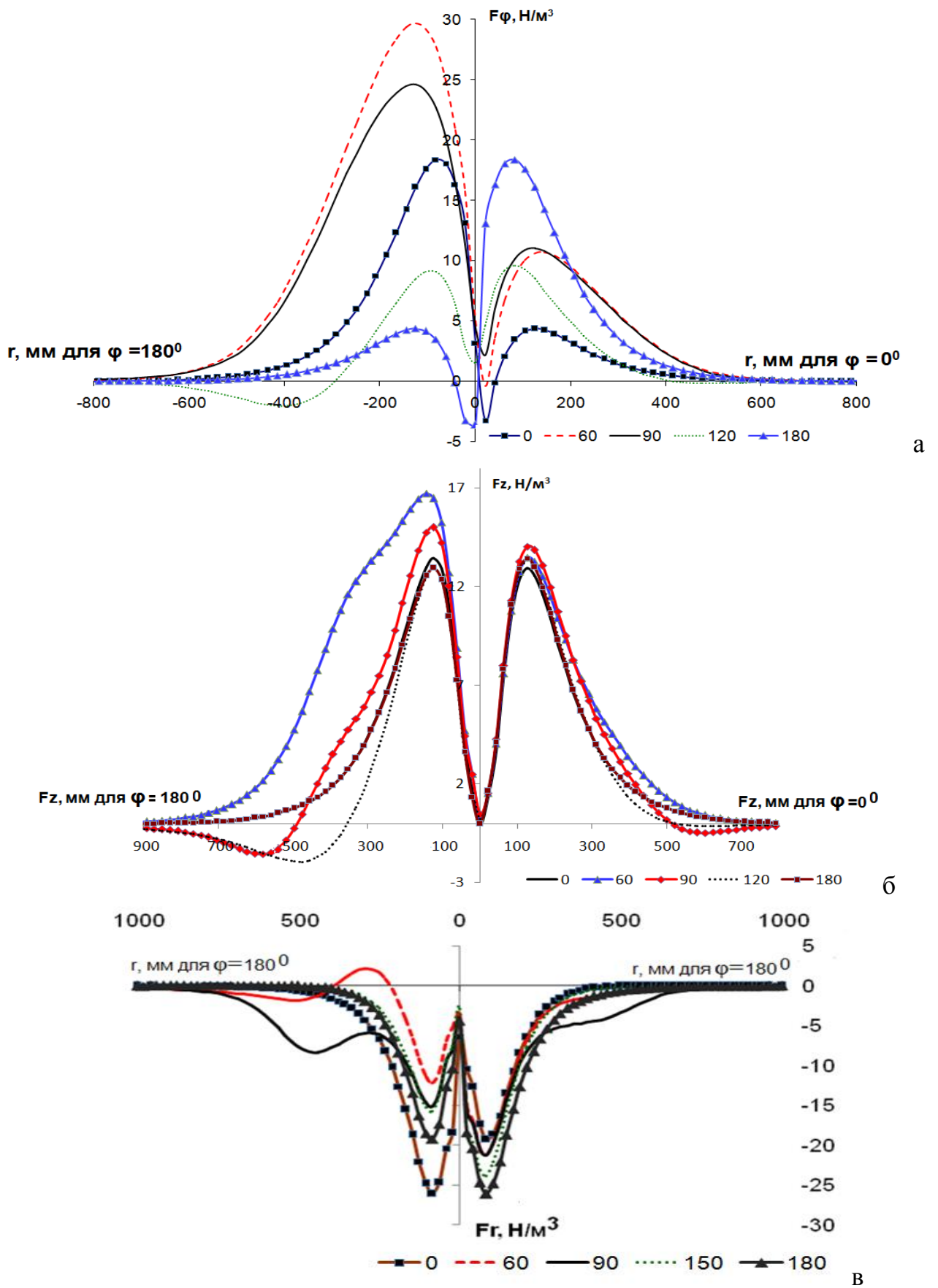


Рисунок 2.27 – Распределение азимутальной F_ϕ (а), осевой F_z (б) и радиальной F_r (в) составляющих ОЭМС по радиусу ванны при различных значениях угла ϕ на середине высоты ванны, $Z/H_6 = 0,5$

Поведение составляющих ОЭМС аналогично рассмотренному выше (см. рисунок 2.26). Значение составляющих ОЭМС как на середине ванны, так и на подине больше у подового электрода, через который проходит больший ток. В объеме ванны проекции ОЭМС при движении от оси к периферии также могут иметь экстремум, причем на середине ванны $Z/H_g = 0,5$ (см. рисунок 2.27) максимум модуля проекции азимутальной составляющей $|F_{\varphi,max}|$ наблюдается при $\varphi=180^0$, осевой составляющей $|F_{z,max}|$ – при $\varphi=90^0$, радиальной составляющей $|F_{r,max}|$ – при $\varphi=0^0$.

Таким образом, установлено, что асимметрия токов через подовые электроды приводит к асимметрии ОЭМС в пространстве, а значит, к появлению перепада давлений в расплаве и образованию дополнительных вихревых течений и усилению перемешивания металла.

2.6.3. Влияние диаметров подовых электродов на объемные электромагнитные силы в жидкой ванне ДППТ

Проанализируем влияние диаметров подовых электродов и их размещение на подине на поведение ОЭМС при равенстве токов, протекающих через аноды ($I_{a1} = I_{a2} = 1,6$ кА; $L_1 = L_2 = 400$ мм; $\varphi_1 = 0^0$, $\varphi_2 = 90^0$, $\Delta\varphi = 90^0$).

Получены распределения составляющих ОЭМС по радиусу ванны R , проходящему через ось первого ПЭ, для области близкой к пятну дуги ($Z/H = 0,03$) (рисунок 2.28, а–в) и области близкой к подине ($Z/H = 0,96$) (рисунок 2.28, г–е). Установлено, что чем больше суммарная площадь ПЭ, тем выше по модулю уровень ОЭМС в области пятна дуги [117].

Изучена зависимость осевой составляющей ОЭМС по радиусу ванны, проходящему через ось первого ПЭ, для областей близких к зеркалу ванны и к подине для разных диаметров ПЭ, оси которых размещены на одинаковом расстоянии от оси ванны ($L_1 = L_2 = 400$ мм). На подине печи ОЭМС сконцентрированы в области анодов. Значения составляющих ОЭМС одного порядка, осевые и радиальные компоненты сил в районе токоподводов максимальны у торцевых краев подовых электродов, а на их оси равны нулю, азимутальная составляющая имеет максимум. Установлено, что в области ПЭ с уменьшением их диаметра ОЭМС по модулю возрастают (см. рисунок 2.28). Это связано с увеличением плотности тока $J_{a1} 4I_{a1} / (\pi d_{a1}^2)$, $J_{a2} 4I_{a2} / (\pi d_{a2}^2)$. Значение

ОЭМС в области ПЭ постоянного диаметра практически не влияет на изменение диаметра другого электрода (рисунок 2.28, г, кривые 1 и 3). Интенсивность ОЭМС, а значит ЭВТ, увеличивается с уменьшением диаметра ПЭ. Минимальный диаметр ПЭ задается его надежной тепловой работой и определяется на основе средней плотности тока $0,3\text{--}0,5 \text{ A/мм}^2$.

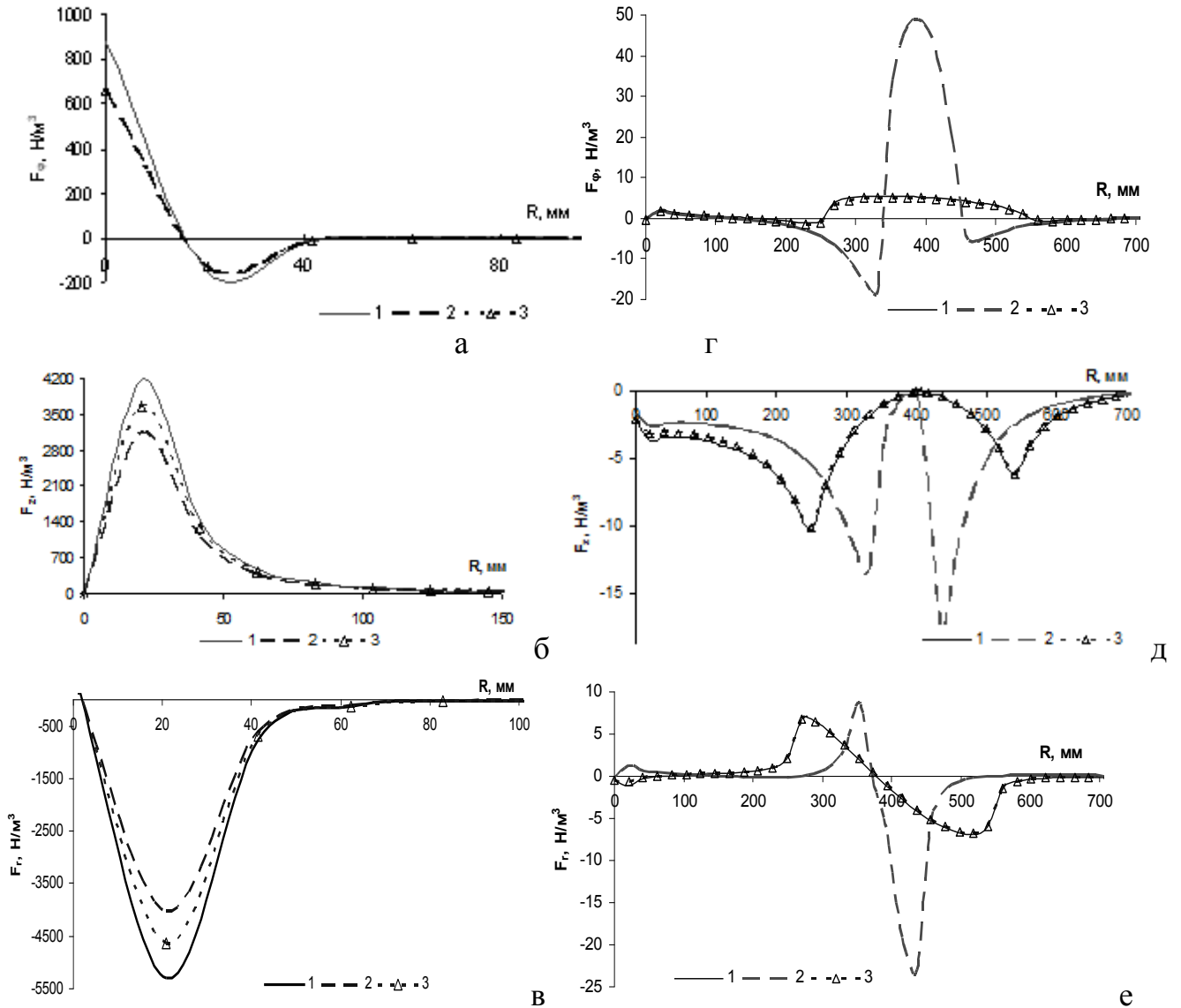


Рисунок 2.28 – Распределение составляющих ОЭМС по радиусу при $L_1 = L_2 = 400 \text{ мм}$: 1 – $d_{a1} = d_{a2} = 300 \text{ мм}$; 2 – $d_{a1} = d_{a2} = 100 \text{ мм}$; 3 – $d_{a1} = 300 \text{ мм}$, $d_{a2} = 100 \text{ мм}$; а–в – $Z = 10 \text{ мм}$; г–е – $Z = 325 \text{ мм}$; F_r , F_z , F_ϕ – радиальная, осевая и азимутальная составляющие соответственно

Проанализирована зависимость проекций ОЭМС при изменении диаметра одного из ПЭ, когда диаметр другого электрода оставался постоянным ($d_{a1} = 300 \text{ мм}$, $d_{a2} = \text{var}$). Установлено, что зависимости для радиальной и азимутальной проекций ОЭМС близки к линейным, причем при изменении одного из диамет-

ров ПЭ в три раза происходит изменение этих сил по модулю вблизи ПЭ на 10–14 % (рисунок 2.29).

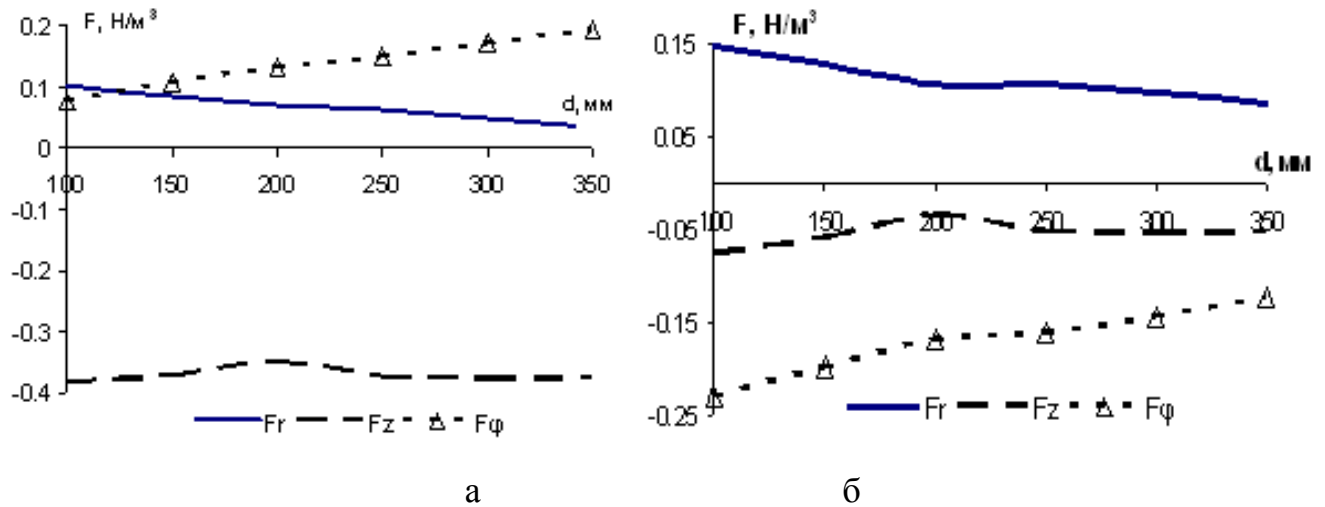


Рисунок 2.29 – Зависимость ОЭМС от диаметра ПЭ ($d_{a1} = 300$ мм, $d_{a2} = \text{var}$) при $I_{a1} = I_{a2} = 1,6$ кА: а – в точке А с координатами $(z, r, 0^0)$; б – в точке В с координатами $(z, r, 90^0)$; F_r , F_z , F_ϕ – радиальная, осевая и азимутальная составляющие ОЭМС

Изучена зависимость ОЭМС от расстояния между осями подового анода и ванны на середине высоты ванны $Z/H_g = 0,5$, когда $L_2 = L_1$ и $L_1 \neq L_2$. Установлено, что ОЭМС имеют максимальные значения при размещении ПЭ на расстоянии $L = 0,3 - 0,4R_g$ (рисунок 2.30).

Проанализировано изменение ОЭМС в зависимости от диаметра подовых электродов для различных точек ванны, расположенных далеко от пятна дуги и подовых электродов. Диаметры анодов меняли от 100 до 350 мм, а в случае $d_{a1} \neq d_{a2}$ диаметр первого анода оставался постоянным $d_{a1} = \text{const} = 300$ мм. Рассмотрены зависимости составляющих ОЭМС от диаметров для двух точек А $(z, r, 0^0)$ и В $(z, r, 90^0)$, где $z = H_g/2$, $r = 0,08R$ мм.

Таким образом, меняя геометрию отдельных элементов конструкции действующих и проектируемых ДППТ, в частности диаметра подовых электродов и их расположение, можно управлять интенсивностью и характером ЭВТ в ванне. С уменьшением диаметра ПЭ в три раза (с 300 до 100 мм) ОЭМС возрастают на 10–14 %, что приводит к увеличению интенсивности электровихревого перемешивания расплава металла. Уменьшение расстояния от осей подовых электродов до центра ванны при-

водит к росту ОЭМС на 50–90%. При этом достигается лучшее взаимодействие шлакового покрова с металлом, что способствует десульфурации и дегазации металла, удалению из расплава водорода, неметаллических включений и серы и улучшает его служебные свойства.

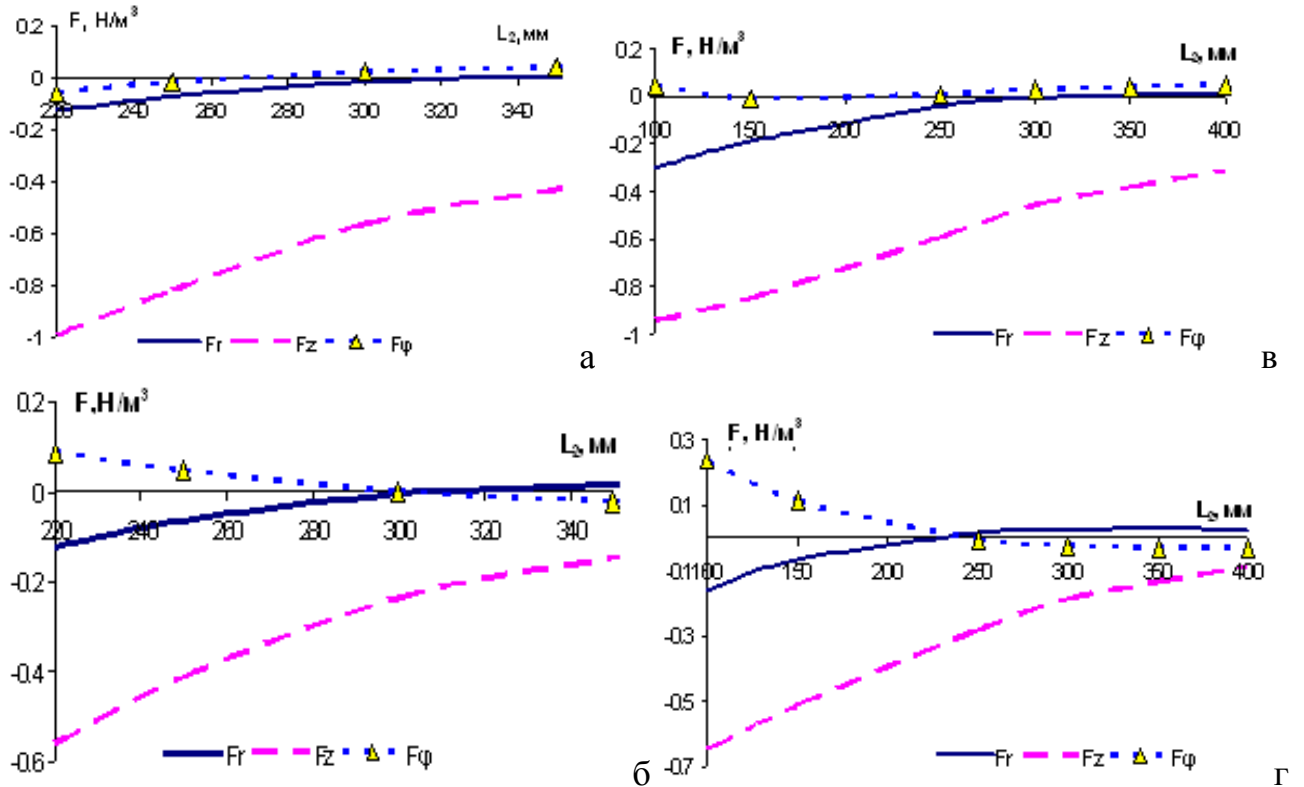


Рисунок 2.30 – Зависимость ОЭМС от расстояния между осями подового анода и ванны на середине высоты ванны $Z/H_g = 0,5$ (а, б – $L_1 = L_2$; в, г – $L_1 \neq L_2$): а, в – для точки А; б, г – для точки В; F_r , F_z , F_φ – радиальная, осевая и азимутальная составляющие ОЭМС соответственно

2.6.4. Влияние взаимного положения подовых электродов

на распределение объемных электромагнитных сил в жидкой ванне ДППТ

Проанализировано влияние угла между осью ванны и осями ПЭ $\Delta\varphi$ на поведение проекций ОЭМС в ванне. При моделировании координаты первого подового электрода были фиксированными ($\varphi_1=0^0$, $L_1=400$ мм), а у второго ПЭ изменялась азимутальная координата ($\varphi_2=var$, $L_2=L_1=const$).

Установлено, что на зеркале металла в области пятна дуги на расстоянии $0,02Z_g$ от оси ванны для ПЭ ($d_{a1} = d_{a2} = 300$ мм) максимальное значение имеет радиальная составляющая (F_r), за счет которой осуществляется движение металла от центра ванны к

периферии, а минимальное – азимутальная (F_φ), вызывающая круговое движение расплава по ванне (таблица 2.8).

Уже на глубине $0,05H_g$ от зеркала металла величины составляющих ОЭМС имеют значения одного порядка как для подовых электродов с диаметром 100 мм, так и для анодов с диаметром 300 мм (рисунок 2.31). Установлено, что составляющие ОЭМС имеют одинаковый порядок и экстремальное значение при величине угла $\Delta\varphi \approx 70\text{--}100^\circ$.

Таблица 2.8 – Значения составляющих объемных электромагнитных сил

Угол $\Delta\varphi$ между подовыми электродами, град	Расстояние от поверхности расплава, мм					
	Радиальная составляющая ОЭМС, Н/м ³		Азимутальная составляющая ОЭМС, Н/м ³		Осевая составляющая ОЭМС, Н/м ³	
	0	20	0	20	0	20
45	7162	-69	517	-64	-1078	107
60	6979	-60	318	-29	-1045	94
75	6777	-51	196	-1	-1009	79
90	6693	-46	165	7	-991	72
105	6769	-49	192	-6	-996	77
120	6917	-55	216	-30	-1012	86
135	6986	-60	320	-50	-1045	94
150	7115	-62	160	-77	-1032	97
165	7157	-63	97	-98	-1035	100
180	7168	-63	105	-109	-1035	100

Аналогичную картину можно наблюдать в области подовых электродов. Однако значения составляющих ОЭМС на два порядка меньше, чем на поверхности, и имеют максимальные величины на торцевых краях подовых электродов.

Получено распределение азимутальной F_φ составляющей ОЭМС по радиусу ванны при различных углах φ в вертикальной плоскости, проходящей через оси ПЭ и ванны ($d_{a1} = d_{a2} = 300$ мм, $L_1 = L_2 = 400$ мм, $\Delta\varphi = 180^\circ$), когда на ПЭ подают одинаковые токи $I_{a1} = I_{a2} = 1,5$ кА (рисунок 2.32, а) или разные токи $I_{a1} = 0,1$ кА, $I_{a2} = 2,9$ кА (рисунок 2.32, б). Установлено, что F_φ при движении от оси к периферии ванны имеет экстремум на расстоянии от 0 до $L_1 - d_{a1}/2$ (см. рисунок 2.32, а). Азимутальные проекции ОЭМС максимальны по модулю на расстоянии 80–150 мм от оси ванны (рисунок 2.32, а). Из анализа графиков получен характер движения металла в вертикальной

плоскости, проходящей через оси ПЭ и ванны и в горизонтальной плоскости над поверхностью ПЭ (рисунок 2.32, в, г).

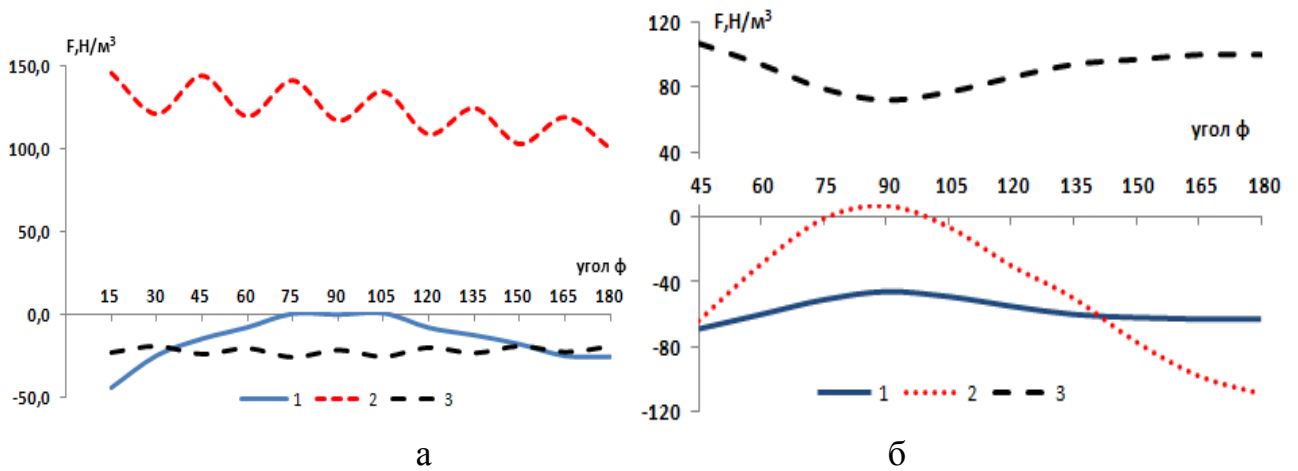


Рисунок 2.31 – Зависимость составляющих ОЭСМ от угла $\Delta\varphi$ на поверхности ванны при $I_{a1} = I_{a2} = 3,0$ кА: а – $d_{a1} = d_{a2} = 100$ мм; б – $d_{a1} = d_{a2} = 300$ мм; 1 – F_r ; 2 – F_φ ; 3 – F_z

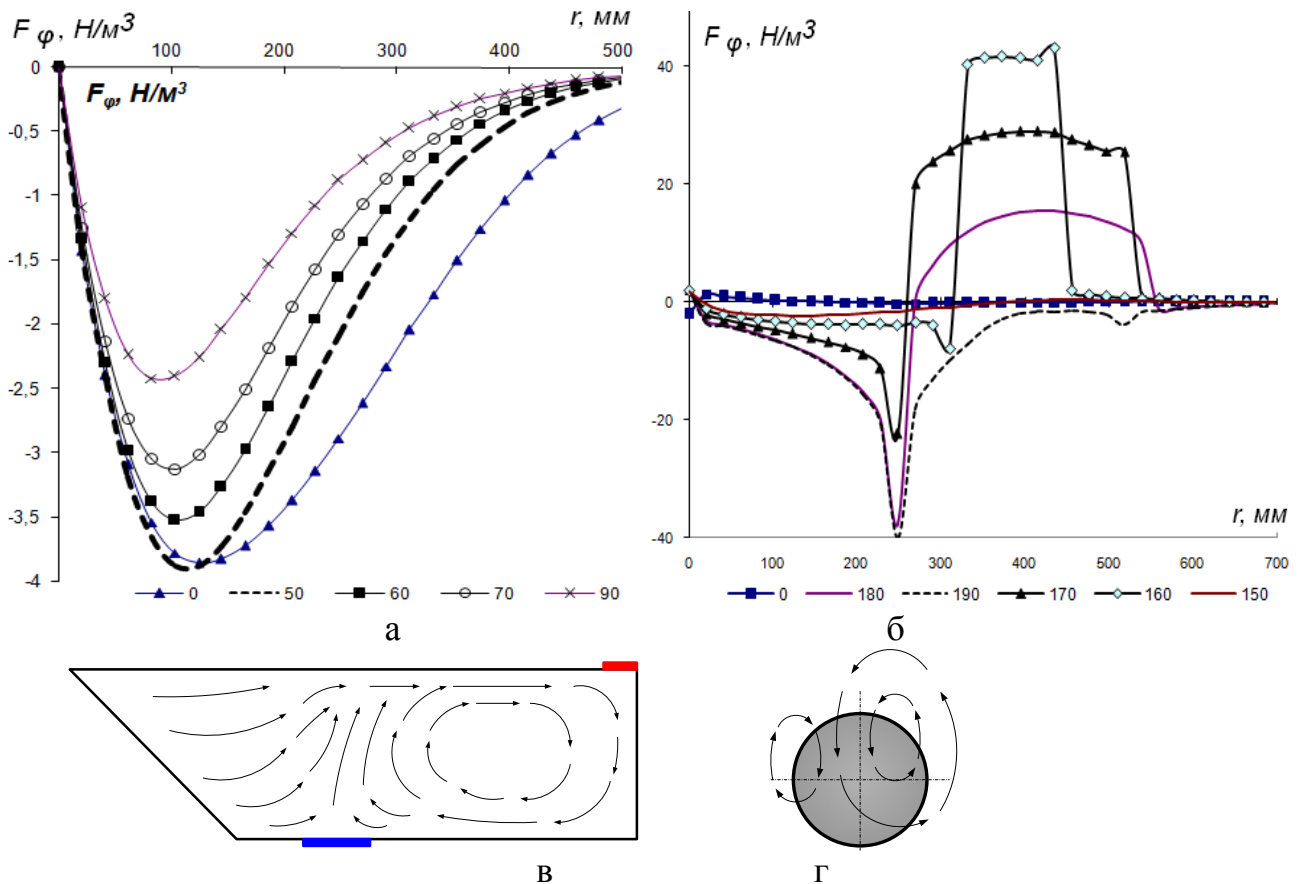


Рисунок 2.32 – Распределение F_φ по радиусу ванны при различных углах φ на ее середине $z/H_e = 0,5$ для двух ПЭ: а – при токе $I_{a1} = I_{a2} = 1,5$ кА; б – при токе $I_{a1} = 0,1$ кА, $I_{a2} = 2,9$ кА; в - характер течения металла в вертикальной плоскости; г – характер течения металла над поверхностью ПЭ в горизонтальной плоскости

2.7. Выводы по второй главе

1. Проанализирована динамика нагрева и плавления кусков ферромарганца различного размера в зависимости от скорости движения жидкого металла. Установлено, что скорость расплава в ванне существенно влияет на время расплавления кусков ферромарганца. Так, при скорости 0,1 м/с время расплавления по сравнению с неподвижным металлом снижается в 6 раз, а при скорости 0,3 м/с – в 10 раз.

2. Предложена математическая модель по нахождению распределений напряженности магнитного поля вблизи токоподводов, имеющих разную форму к подовому электроду и использующихся при кондукционном перемешивании металла в ванне ДППТ.

3. На основе характера ОЭМС изучен характер электровихревых течений в жидкой ванне при одном и двух подовых электродах.

4. Установлено, что при кондукционном перемешивании наиболее перспективными являются конструкции токоподводов в форме плоской спирали Архимеда, имеющей 2–3 витка, и в форме винтовой линии, содержащей 5–6 витков.

5. При использовании электровихревого перемешивания жидкой ванны в ДППТ с двумя подовыми электродами предлагаются следующие конструкционные параметры: подовые электроды должны образовывать двугранный угол между их осями и осью симметрии ванны $70\text{--}100^\circ$; расстояние от оси ванны до осей подовых электродов – 0,3–0,4 радиуса подины ванны; площадь контакта подового электрода с металлом должна быть минимально возможной и определяться тепловой работой подового электрода и износом футеровки.

6. Установлено, что при синхронном увеличении диаметров обоих подовых электродов составляющие объемных электромагнитных сил в жидкой ванне остаются практически постоянными. При изменении одного из диаметров в 3 раза происходит изменение этих сил по модулю вблизи подовых электродов на 10–14 %.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ХАРАКТЕРА ТЕЧЕНИЯ ТОКОНЕСУЩЕГО РАСПЛАВА ОТ ВНЕШНИХ И СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ЖИДКОЙ ВАННЕ

Исследование механизма образования электровихревых течений, которые возникают в токонесущем расплаве в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем [111], необходимо для более детального понимания особенностей технологических процессов, протекающих в электрометаллургических агрегатах, имеющих токонесущий расплав.

Изучение течения расплава металла в жидкой ванне под действием собственных и внешних магнитных полей с использованием физического моделирования хотя и не дает полной информации об исследуемом объекте, но позволяет сопоставить его с результатами математического моделирования и выявить инвариантные моменты, а также дифференцированно оценить количественное влияние различных факторов и определить среди них наиболее существенные.

В данной главе с помощью физического моделирования проведено изучение качественной роли отдельных факторов на поведение токонесущего расплава, а именно: влияние количества подовых электродов и их размещение на подине; воздействие на течение жидкого металла смещения оси катода от оси ванны; понимание процесса перемешивания при смещении подовых электродов от оси ванны и асимметрии токов, протекающих через них. Показаны результаты экспериментальных исследований кондукционного и электровихревого перемешивания на расплав металла в модельной ванне. Проанализирована адекватность созданных математических моделей, рассмотренных во второй главе.

3.1. Выбор критериев подобия для физического моделирования

В работах [64–69, 72, 73] изучался характер ЭВТ в лабораторных условиях на ртутных моделях и эвтектических сплавах, которые при комнатных температурах имеют жидкое состояние и позволяют проводить визуальное наблюдение. Авторы определили условия однородности токонесущей жидкости, ламинарный характер ЭВТ и малое влияние тепловой конвекции. Анализ известных результатов показывает, что при моделировании в токопроводящих расплавах основным вопросом является предва-

рительная оценка режима исследуемого течения: вязкий или инерционный, преобладание электровихревых течений или тепловой конвекции.

На характер течения жидкого металла в ванне оказывают влияние различные факторы: поверхностное натяжение, силы вязкости, гравитация, электромагнитные и инерционные силы и т.д. Для физического моделирования процессов в токнесущей жидкости воспользуемся критериями подобия. Для этого введем ряд допущений. Чтобы пренебречь релятивистскими эффектами, будем считать жидкий расплав металла изотропным и однородным, который движется достаточно медленно. Его динамическая вязкость η , плотность γ , проводимость σ – скалярными величинами, которые не зависят от температуры, от напряженностей электрического и магнитного полей. Будем рассматривать только стационарное течение металла ($\partial W / \partial \tau = 0$). От переменного характера электромагнитного поля в большинстве случаев можно абстрагироваться, т.к. электромагнитные процессы протекают существенно быстрее тепловых и гидродинамических ($\partial H / \partial \tau = 0$, $\partial E / \partial \tau$). В металлургической ванне расплавы шлака и металла – это среды с высокой электропроводностью, поэтому свободные заряды в жидкометаллической ванне отсутствуют. Примем также, что имеет место электродинамическое приближение $\mu_0 |v \times H| \ll J / \sigma$, т.е. вторичные токи, индуцируемые движением жидкости со скоростью v в магнитном поле \vec{H} пренебрежительно малы в сравнении с плотностью тока J . Тогда система уравнений теории ЭВТ в стационарном случае описывается уравнениями Навье-Стокса магнитной гидродинамики [61], включающими объемные электромагнитные силы

$$\gamma \left[\frac{\partial \vec{W}}{\partial \tau} + (\vec{W} \text{ grad}) \vec{W} \right] = -\text{grad } P - \gamma \vec{g} + \eta \nabla^2 \vec{W} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (3.1)$$

и уравнение неразрывности

$$\text{div } \vec{W} = 0. \quad (3.2)$$

Левая часть уравнения (3.1) – это сила инерции, первое слагаемое правой части – результирующая сил давления, второе – сила тяжести (где g – ускорение свободного падения), третье – вязкая сила (где η – коэффициент динамической вязкости), четвертое – объемная электромагнитная сила.

Считаем, что магнитные и электрические поля определяются векторами напря-

женности магнитного \vec{H} и электрического \vec{E} полей. Принятые допущения позволяют систему уравнений Максвелла представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rot} \vec{H} = \vec{J}, \\ \text{rot} \vec{E} = 0, \\ \text{div} \vec{E} = 0, \\ \text{div} \vec{H} = 0. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (3.3) \\ (3.4) \\ (3.5) \\ (3.6) \end{array}$$

Из-за существующей технологии нагрева расплава излучением дуги сверху влияние тепловой конвекции на его перемешивание пренебрежимо мало. Исходя из выводов, описанных в работах [8, 65, 66, 68, 70, 118–120], примем, что токонесущая жидкость однородна, поэтому можно использовать только два критерия – подобия число Рейнольдса и параметр электровихревого течения

$$\text{Re} = W_0 L_0 / \nu; \quad (3.7)$$

$$S = \mu_0 I_0^2 / (\gamma \nu^2), \quad (3.8)$$

где W_0 – характерная скорость потока, м/с; L_0 – характерный размер, ν – кинематическая вязкость, м²/с; μ_0 – магнитная постоянная, Н/А²; I_0 – характерная сила тока, А; γ – плотность расплава, кг/м³.

При развитии турбулентном течении вместо кинематической вязкости ν вводится эффективная вязкость $\nu_{\text{эфф}} = \nu + \nu_m$, причем турбулентная добавка $\nu_m \sim k^2 / \varepsilon$ зависит от кинетической энергии пульсаций k и скорости ее диссипации ε ($k - \varepsilon$ модель турбулентности) [120]. Согласно результатам работы при больших $S - k \sim I_0^2$ и $\varepsilon \sim I_0^3$, поэтому $\nu_m \sim I_0$.

Оценим скорость ЭВТ, возникающего вблизи круглого электрода. Считаем, что ЭВТ имеет вид затопленной струи, истекающей из сопла круглого сечения.

Известно, что затопленные струи крайне неустойчивы и, как следствие этого, имеют низкие значения числа Рейнольдса $\text{Re} = W_0 L_0 \cdot \rho / \nu$, где W_0 – характерная скорость потока, м/с; L_0 – характерный размер, ρ – плотность расплава, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Для перехода от ламинарного режима к турбулентному как для плоских, так и для круглых затопленных струй критическое значение числа Рейнольдса составляет

$Re_{кр}=3-10$, в некоторых случаях это значение может быть увеличено до 290 [121].

Определим число Рейнольдса для ЭВТ для подового электрода диаметром 300 мм. Температура стали в ванне ДППТ приблизительно равна $1565 \pm 30^{\circ}\text{C}$. По данным Явойского В.И. [122], плотность и вязкость стали будем считать равными $\rho=7000 \text{ кг/м}^3$ и $\mu = 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$ соответственно. По данным [39] максимальная скорость движения расплава вблизи ПЭ печи составляет $W \approx 0,1 \text{ м/с}$. Получаем $Re = 3,28 \cdot 10^8$. Данное значение говорит о том, что режим течения струи металла имеет развитый турбулентный характер, по крайней мере, в приэлектродной области. Аналогичные оценки числа Рейнольдса показывают, что вблизи пятна дуги движение также имеет турбулентный характер.

Как отмечают авторы работ [61, 123, 124], структура и интенсивность течения не зависят от полярности постоянного тока и не изменяются при замене постоянного тока переменным промышленной частоты, что согласуется с известными теоретическими и экспериментальными результатами.

В теоретических работах [61, 62] показано, что завихренность электромагнитной силы может быть уравновешена только вязкими напряжениями. Свойство автомодельности развитых турбулентных течений в общей гидродинамике хорошо известно. При этом влияние вязких пограничных слоев на автомодельность тем слабее, чем выше скорости течения.

Вязкие силы являются определяющими при малой скорости расплава, например при стоксовом режиме течения число Рейнольдса $Re = S$ [61], откуда

$$W_0 = \frac{\nu}{L_0} S = \frac{\mu_0 I_0^2}{\gamma \nu L_0} \sim S \sim I_0^2. \quad (3.9)$$

В работе [117] показано, что параметр S характеризует соотношение объемных электромагнитных сил и сил вязкости жидкости. Качественная зависимость характерной скорости от параметра S связана двумя критическими значениями S_1 (ему соответствует I_1) и S_2 (ему соответствует I_2) (рисунок 3.1). При $0 < S < S_1$ ЭВТ имеет стоксов режим, при $S_1 < S < S_2$ – переходный и при $S > S_2$ – развитый нелинейный. В стоксовом и развитом режимах структура поля скоростей не зависит от величины параметра S . Если $S_H < S_1$ или $S_H > S_2$, то условие $S = idem$ необязательно.

Проведенные расчеты в работе [111] показывают, что линейная зависимость

скорости от тока для условий промышленной ДППТ наблюдается при токах I_0 более

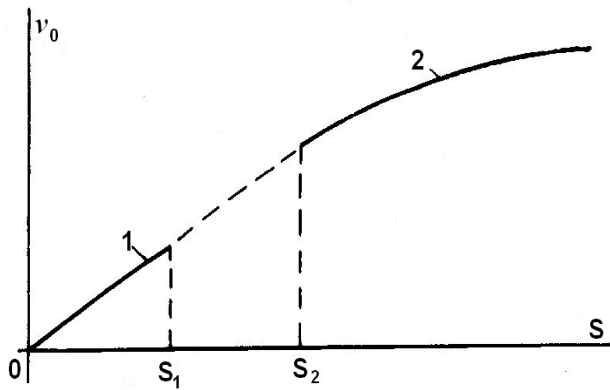


Рисунок 3.1 – Зависимость характерной скорости v_0 от S : 1 – v_0 пропорциональна $S(I^2)$; 2 – v_0 пропорциональна $S(I)$ [117]

екту и $Re=idem$.

Краевые условия дают критерии геометрического подобия. В.Я. Кубланов [120] пришел к выводу, что для обеспечения соотношения электромагнитных и инерционных сил в расплаве в районе токоподводов приближенное подобие может быть обеспечено при выполнении условия

$$\Pi = \frac{J_0 L_0^2}{\nu} \sqrt{\frac{\mu_0}{\gamma}} = idem, \quad (3.10)$$

где $J_0 = I/(D^2 \pi)$ – характерная плотность тока в области токоподводов (пятна дуги или в области подового электрода); D – характерный диаметр токоподводов (пятна дуги или подового электрода).

Расчеты, выполненные в работе [111], показали, что при заданном характерном токе ($I_0 = I_0$) и геометрии ванны ($L_0 = R_g$) для $S=idem$ характер течения во многом определяется плотностью тока в районе токоподводящих электродов, то есть зависит от Π .

По данным Ю.П. Ивочкина [125], условия возникновения горизонтальных течений в присутствии внешнего магнитного поля принято определять с помощью соотношения критериев S (3.8) и N . Параметр N описывает интенсивность горизонтального вращения, вызывающего вторичное вихревое течение в меридиональной плоскости ванны [132], и может быть определен как

100 А. Для современных ДППТ номинальные токи существенно выше, поэтому мы имеем $S > S_2$, т.е. ЭВТ имеют развитый нелинейный режим, и мы попадаем в область автомодельности ($S=10^6-10^9$), поэтому условие $S=idem$ при физическом моделировании необязательно [119]. Главное, чтобы на модели также выполнялось условие $S > S_2$. Следовательно, единственным требованием к модели остается ее геометрическое подобие объ-

$$N = \frac{I\mu_0 HL}{\rho v^2}, \quad (3.11)$$

где I – сила тока, А; H – напряженность магнитного поля, А/м; L – характерный размер системы; ρ – плотность расплава, кг/м³; v – кинематическая вязкость металла, м/с².

При токах $50 \leq I \leq 300$ А параметр ЭВТ S соответствует диапазону $1,4 \cdot 10^6 \leq S \leq 5 \cdot 10^8$, а параметр N – $3,5 \cdot 10^6 \leq N \leq 4 \cdot 10^9$. Формирование вторичных вихрей в меридиональной плоскости, вызванных закручиванием горизонтальных потоков, возможно при соотношении N/S в диапазоне $0,4 < N/S < 8$.

Определим критерии S и N для нашего случая. Суммарный ток, подаваемый на электроды, $I=100$ А, напряженность магнитного поля $H=1000$ А/м, диаметр ванны (характерный размер системы L) – 0,24 м.

$$N/S = \frac{I\mu_0 H}{L\rho v^2} / \frac{\mu_0 I^2}{\rho v^2} = \frac{HL}{I} = 2,4.$$

Общая картина течения, полученная при экспериментальных исследованиях, подтверждается удовлетворительным соответствием с численными расчетами, проведенным в главе 2.

3.2. Определение параметров экспериментальной физической модели

Электровихревые течения исследовались на экспериментальной установке, которая моделирует ЭВТ в пятитонной ванне ДППТ стандартной конфигурации. Основные геометрические размеры и технологические характеристики промышленной ДППТ приведены в таблице 2.8 и показаны на рисунке 2.8.

При физическом моделировании были учтены следующие положения теории подобия [126, 127], прежде всего, геометрическое подобие реальной и модельной ванны ДППТ, а также выполнение условий $Re = idem$, $\Pi = idem$.

Определим геометрический масштаб для токоподводов, используя параметр Π . Данные, относящиеся к оригиналу, берем со штрихом. Учитывая геометрический масштаб $M_L = L'/L$ и масштаб токов $M_I = I'/I$, запишем (3.10) как:

$$\frac{J'L^2}{v'} \sqrt{\frac{\mu_0}{\gamma'}} = \frac{JL^2}{v} \sqrt{\frac{\mu_0}{\gamma}} \quad \text{или} \quad \frac{I'L^2}{D'^2 \pi v'} \sqrt{\frac{1}{\gamma'}} = \frac{I L^2}{D^2 \pi v} \sqrt{\frac{1}{\gamma}}, \quad \text{получим}$$

$$\frac{D'}{D} = M_L \sqrt{M_I \frac{\nu}{\nu'} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}}}. \quad (3.12)$$

В качестве модельной жидкости в экспериментах использовалось олово при перегреве выше температуры плавления на 10-500С. Теплофизические свойства расплава стали и модельной жидкости (олово) приведены в таблице Д.1 (Приложение Д).

Условия подобия и соотношения масштабов для расчетов параметров модели и пересчет параметров на оригинале сведены в таблице. 3.1.

Геометрический масштаб задаем исходя из удобства проведения лабораторных исследований $M_L=10$. Масштаб скорости $M_W = \frac{W'}{W}$ определяем из условия $Re=iden=WL/\nu$. Установлено, что скорость на оригинале примерно в 4 раза меньше, чем на модели. Масштаб токов M_I определяем исходя из возможности лабораторной установки и мощности лабораторного трансформатора 10 кВт, позволяющего получать максимальные токи $I=1200$ А. Зная M_L и M_I , из условия $\Pi=iden$ определялся масштаб M_D , полученные размеры для пятна дуги и подовых электродов на модели в 14 раз меньше, чем на оригинале.

Таблица 3.1 – Основные определяющие критерии и значения полученных масштабов и величин

Определяющий критерий	Определяемая величина	Значения полученных масштабов и величин
M_L	Геометрический масштаб и размеры модели	$M_L = L'/L=10$ $L = L'/10$
$Re= idem$	Скорость расплава	$M_W = \frac{W'}{W} = \frac{\nu'}{\nu} \frac{1}{M_L} \approx 0,24$ $W' = 0,24W$
M_I	Масштаб токов	$M_I = I'/I=5$
$\Pi=iden$	Геометрический масштаб пятна дуги и подовых электродов	$M_D = \frac{D'}{D} = M_L \sqrt{M_I \frac{\nu}{\nu'} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma'}}} \approx 14$ $D' = 14 \cdot D$

На основании выбранного масштаба M_L получены основные размеры модельной ванны № 1 лабораторной установки, которые приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Размеры экспериментальной ванны № 1

Параметр	Значение
Диаметр ванны D_6 , мм	240
Высота ванны h_6 , мм	40
Угол откоса ψ_0 , град	33
Диаметр подовых электродов (анодов) $d_{a1} = d_{a2}$, мм	8, 20, 30
Расстояние от центра ванны до центра анодов, мм	40
Диаметр электрода, моделирующего пятно дуги, r_n , мм	8

3.3. Описание экспериментальной установки и методика проведения исследований

Для исследования характера ЭВТ в ванне была создана экспериментальная установка (рисунок 3.2), которая включала в себя источник электропитания постоянного тока для дугового нагрева, источник больших токов для создания ЭВТ, контрольно-измерительную аппаратуру и две плавильных емкости, моделирующие ванну расплава пятитонной ДППТ стандартной конфигурации [128–130].

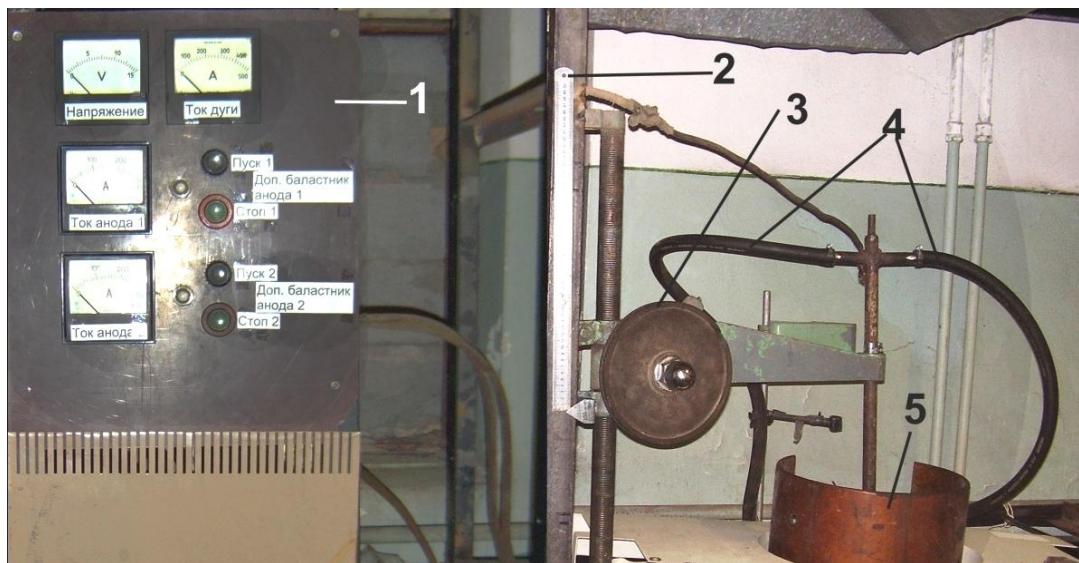


Рисунок 3.2 – Экспериментальная установка: 1 – стенд с приборами контроля (вольтметры, амперметры); 2 – измерительная линейка; 3 – механизм вертикального перемещения электрода; 4 – система водяного охлаждения катода; 5 – ограждение от излучения дуги

Электропитание установки обеспечивалось двумя трансформаторами. Первый трансформатор 220/60 В давал ток на вторичной обмотке до 200 А при напряжении 30–40 В и использовался для расплавления олова в лабораторной дуговой печи постоянного тока. Второй трансформатор 380/6 В позволял давать переменный ток

на вторичной обмотке до 1200 А при напряжении около 5 В и использовался при проведении экспериментов по изучению ЭВТ расплава.

Регулирование тока дуги проводилось включением балластных реостатов с помощью пусковых реле. Токоподвод осуществлялся сверху через осевой графитированный электрод и снизу – через четыре медных ПЭ, которые подключались к источнику питания в зависимости от заданных условий эксперимента.

Электрические приборы установлены на стенде с металлическим каркасом. В систему контроля и измерения входили приборы для определения тока и напряжения на дуге. В соответствии с задачами исследования система измерений позволяла снимать вольтамперные характеристики. Для измерения тока дуги и анодов использовались амперметры М325 с классом точности 0,5. Измерение напряжения на дуге проводили с помощью вольтметров М325 (класс точности 0,5). Измерение силового тока, протекающего от второго трансформатора, проводили с помощью клещей Дитца Ц4505М и Clamr meter M1266С, погрешность измерения тока не превышала $\pm 0,5\%$.

Графитированный электрод (катод) соединялся резьбовым соединением с водоохлаждаемой штангой. По мере выгорания графитированного электрода производилась его замена на новый. Все элементы водяной системы установки соединялись резиновыми шлангами.

Измерение температуры расплава проводили с использованием погружной ХК термопары и цифрового термометра ТМ902С, а температуры поверхности расплава посредством инфракрасного пирометра GM7QO Version: GM700-EN-00, который позволял измерять температуру до 700°C , с погрешностью $\pm 1,5\%$. Измерение геометрических размеров осуществляли штангенциркулем с точностью 0,1 мм. Погрешность измерений для наименьшего размера анода составляла 0,6%. Для визуального изучения характера течения расплава проводилась видеосъемка цифровой камерой Canon PowerShotA710IS.

Исследования проводились на двух плавильных ваннах: первая моделировала свободную поверхность по зеркалу металла; вторая – меридиональную плоскость ванны ДППТ (вертикальной плоскости, проходящей через оси ванны и ПЭ). Плавильные ванны №1, 2 были изготовлены с учетом рекомендаций, полученных во второй главе. Был выбран двугранный угол между осями подовых электродов и осью

симметрии ванны, 90° , а расстояние между осями ПЭ и осью ванны составило $0,3$ радиуса ванны.

Первая плавильная ванна (рисунок 3.3) выполнена в форме усеченного конуса в соответствии с параметрами геометрического подобия, диаметр ванны по поверхности жидкого металла $D_6=240$ мм, ее высота $H=40$ мм; угол откоса $\psi=33^{\circ}$. Три цилиндрических медных подовых электрода диаметром 16 мм вмонтированы в днище ванны на расстоянии 40 мм от центра ее оси. Если считать, что ось первого электрода проходит через азимутальную координату $\varphi=0^{\circ}$, тогда второго $-\varphi=90^{\circ}$, третьего $-\varphi=180^{\circ}$. Четвертый ПЭ такого же диаметра располагался по оси ванны.

После расплавления олова и получения жидкой ванны, в зависимости от условий эксперимента, через электроды к расплаву подводился ток от силового источника питания. Для визуального наблюдения ЭВТ и кондукционных течений расплава графитированный электрод заменялся на верхний токоподвод через медный стержень диаметром 8 мм, который перемещали по радиусу ванны и вдоль ее оси с помощью механизма перемещения электрода. Стержень закрепляли на медном держателе и погружали в металл на глубину 1–2 мм для обеспечения надежного электрического контакта с расплавом при отсутствии дугового разряда.

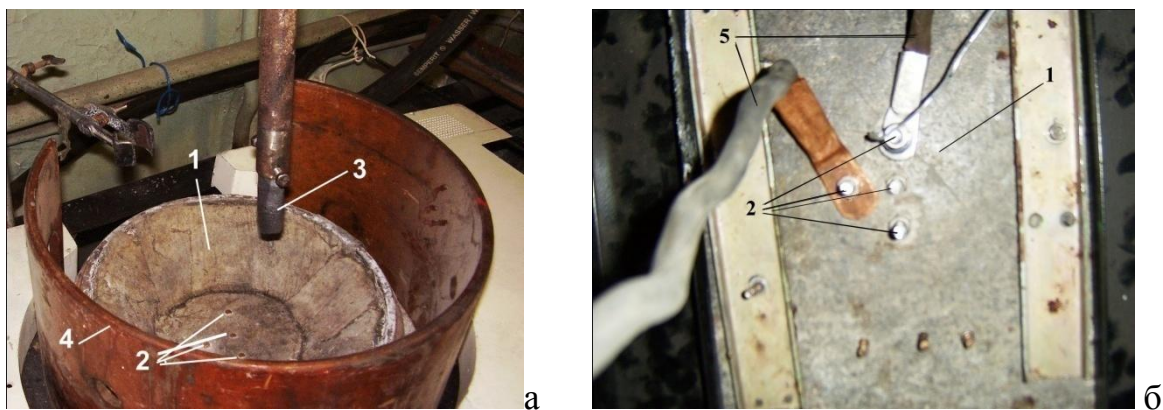


Рисунок 3.3 – Экспериментальная плавильная ванна №1: а – вид сверху; б – вид снизу; 1 – керамические стенки плавильной ванны; 2 – подовые электроды; 3 – графитированный электрод; 4 – ограждение; 5 – силовые кабели к подовым электродам

Плавильная емкость ванны №2 для моделирования движения расплава в меридиональной плоскости ДППТ имела форму полуцилиндра радиусом 125 мм, высотой 40 мм со свободной поверхностью, проходящей через оси ванны и электродов. В боковые стенки ванны вмонтированы четыре медных электрода, которые своими тор-

цевыми поверхностями контактируют с зеркалом металла (рисунок 3.4). С одной стороны размещены три электрода (анода), один из которых установлен по оси ванны, а два других – на расстоянии 80 мм от него. С другой стороны по оси ванны размещен один электрод, имитирующий катод. Медные аноды были сменными и имели диаметры $d_{a1}=8$ мм, $d_{a2}=20$ мм, $d_{a3}=30$ мм, диаметр катода – $d_k=8$ мм.

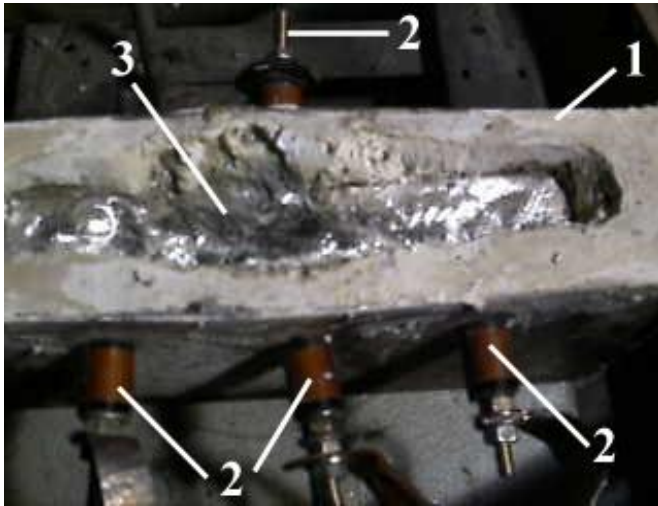


Рисунок 3.4 – Экспериментальная плавильная ванна №2:
1 – керамические стенки плавильной ванны; 2 – медные электроды; 3 – расплав олова

Для расплавления олова зажигали электрическую дугу между графитированным электродом и поверхностью ванны (ток дуги $I_d \approx 200$ А, напряжение $U \approx 150$ В). Для уменьшения теплотерь и увеличения скорости плавления и снижения угара олова ванну накрывали асбестовой крышкой.

Для визуального наблюдения ЭВТ на электроды подавали ток $I \approx 1000$ А от силового источника питания с напряжением холостого хода 6 В, причем при подаче напряжения на два анода токи через них были примерно одинаковыми ($I_{a1} \approx I_{a2} = 500$ А) и суммарный ток, измеренный токовыми клещами, составлял примерно 1200 А. Схема подключения электродов показана на рисунке 3.5. Отдельные этапы проведения эксперимента показаны на рисунке 3.6.

В ходе экспериментов на ваннах №1 и 2 проводилась видео- и фотосъемка поведения расплава, видеокамеру крепили на штативе, причем съемку вели с различных ракурсов. Для получения контрастного изображения установку освещали галогенной лампой мощностью 150 Вт. На каждую комбинацию подключенных ПЭ выполнялась серия экспериментов. Далее посредством анализа видео- и фотоматериалов проводилось детальное изучение характера течения расплава.

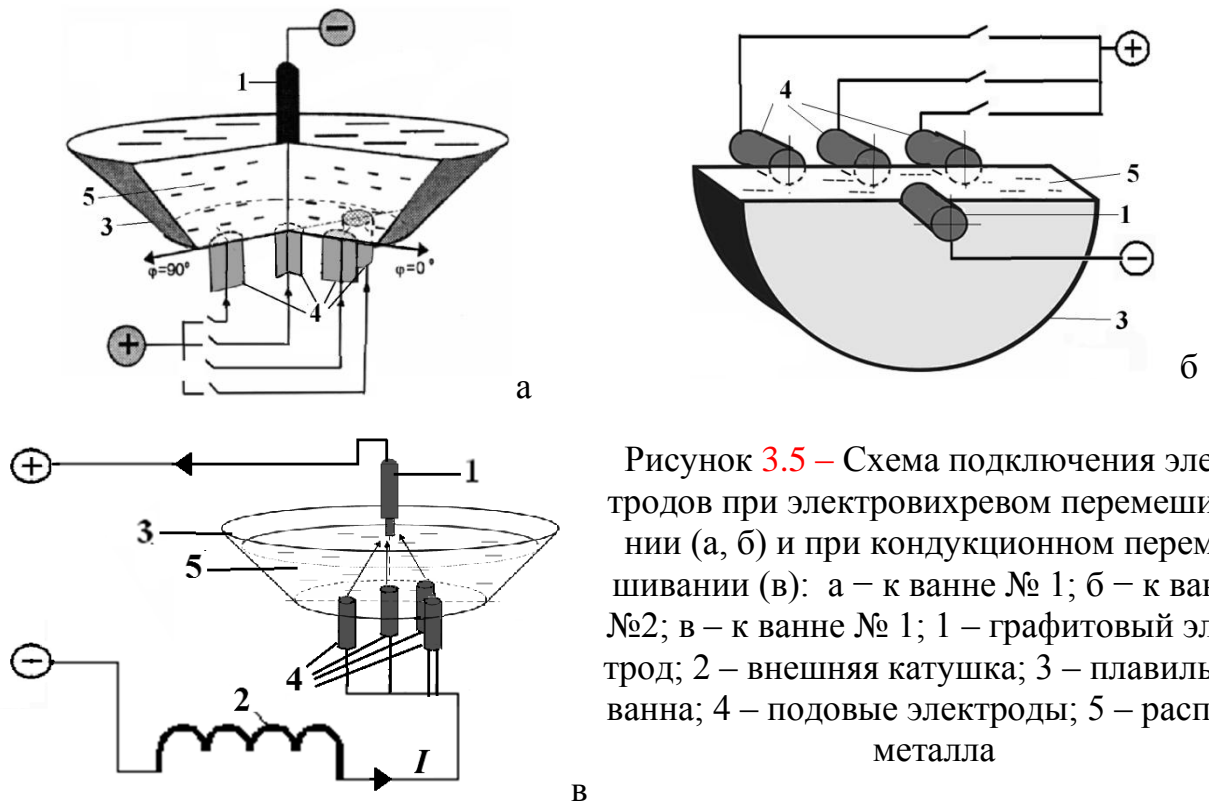


Рисунок 3.5 – Схема подключения электродов при электровихревом перемешивании (а, б) и при кондукционном перемешивании (в): а – к ванне № 1; б – к ванне №2; в – к ванне № 1; 1 – графитовый электрод; 2 – внешняя катушка; 3 – плавильная ванна; 4 – подовые электроды; 5 – расплав металла

3.4. Результаты визуальных экспериментальных исследований характера электровихревых течений при разном расположении катода и подовых электродов

В экспериментах определялся характер ЭВТ в расплаве в зависимости от количества подовых электродов, расположения катода и подовых электродов. Исследование характера ЭВТ на свободной поверхности ванны проводилось с использованием экспериментальной ванны № 1. Подключение подовых электродов к источнику питания осуществлялось по одному из шести вариантов, рассмотренных ранее при математическом моделировании п. 2.6:

- ось катода совпадает с осью ванны ($r=0$ мм):
 - 1) один подовый электрод, ось которого совпадает с осью ванны и осью катода;
 - 2) один подовый электрод, ось которого не совпадает с осью ванны;
 - 3) два подовых электрода, оси которых находятся в одной плоскости с осью ванны, угол между электродами $\Delta\varphi = 180^0$;
 - 4) два подовых электрода (угол между электродами $\Delta\varphi = 90^0$);
 - 3) два подовых электрода, оси которых находятся в одной плоскости с осью ванны, угол между электродами $\Delta\varphi = 180^0$;



Рисунок 3.6 – Этапы проведения эксперимента: а – включение экспериментальной установки; б – зажигание дуги; в – отключение дуги; г – проплавление колодца; д – свободная поверхность расплава; е – подключение медного стержня; ж – удаление шлака скребком; з – погружение медного стержня в расплав

- 4) два подовых электрода (угол между электродами $\Delta\varphi = 90^0$);
- ось катода не совпадает с осью ванны ($r \neq 0$ мм):
- 5) ось катода имеет координаты $r = 80$ мм, $\varphi = 225^0$; два подовых электрода (угол между электродами $\Delta\varphi = 90^0$);
- 6) ось катода имеет координаты $r = 80$ мм, $\varphi = 180^0$; один подовый электрод.

Исследование характера ЭВТ в меридиональной плоскости проводилось с использованием экспериментальной ванны № 2.

Рассмотрим характер течения расплава при первом варианте подключения электродов. Если диаметры анода и катода примерно равны ($d_a \approx d_k$), то в меридиональной плоскости в межэлектродном пространстве образуются два осесимметричных вихря с каждой стороны относительно оси ванны (рисунок 3.7, а). Если диаметр анода существенно больше диаметра катода ($d_a \gg d_k$), то наблюдается один вихрь (рисунок 3.7, б). На свободной поверхности отмечалось слабое движение расплава от стенок ванны к ее центру, где осуществляется его втягивание под катод (рисунок 3.7, в). В целом в характере движения расплава имеет место осевая симметрия.

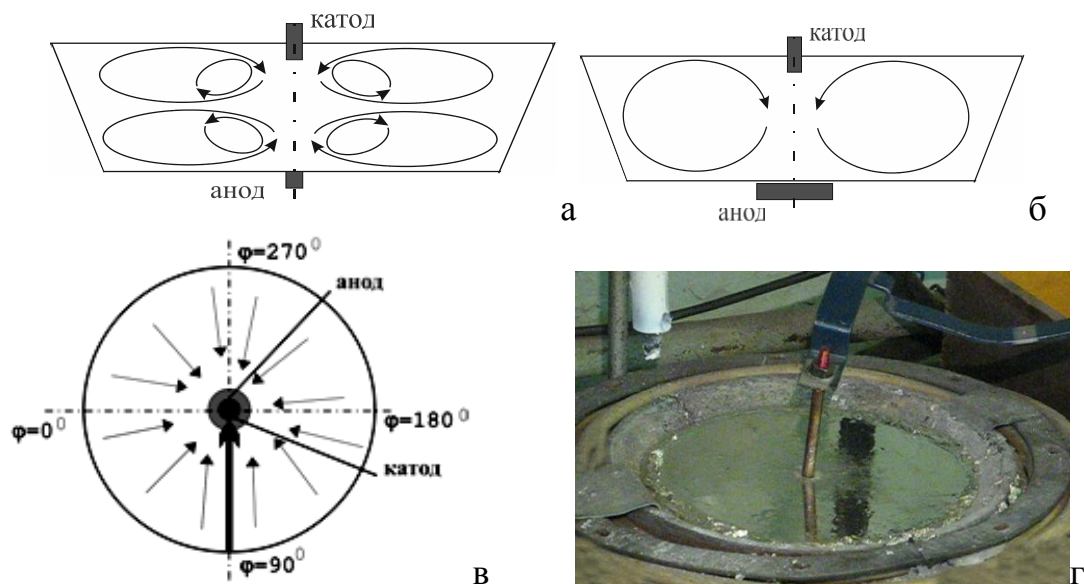


Рисунок 3.7 – Характер течения металла в ванне ДППТ с одним подовым электродом, ось которого совпадает с осью ванны: а – схема течения в меридиональной плоскости ванны при $d_a = d_k$; б – схема течения в меридиональной плоскости ванны при $d_a \gg d_k$; в – схема течения на свободной поверхности расплава при любом диаметре анода; г – фотография поверхности ванны №1 во время эксперимента; \rightarrow – линия замера средней скорости расплава

При других вариантах расположения анода(ов) и катода движение расплава имеет более сложный характер за счет возникновения азимутальных течений.

Второй вариант подключения. В случае равенства диаметров анода и катода ($d_a \approx d_k$) в меридиональной плоскости, проходящей через ось ванны и ось анода и близких к ним, образуются два разнонаправленных вихря (рисунок 3.8, а, справа), в остальных плоскостях – один вихрь (рисунок 3.8, а, слева). Однако при таком варианте подключения возможно образование локальных вихрей в области над ПЭ и слабое течение в областях, удаленных от оси ванны и подового электрода. Более сильное течение наблюдалось в случае установки анода большого диаметра $d_a \gg d_k$ (рисунок 3.8, б).

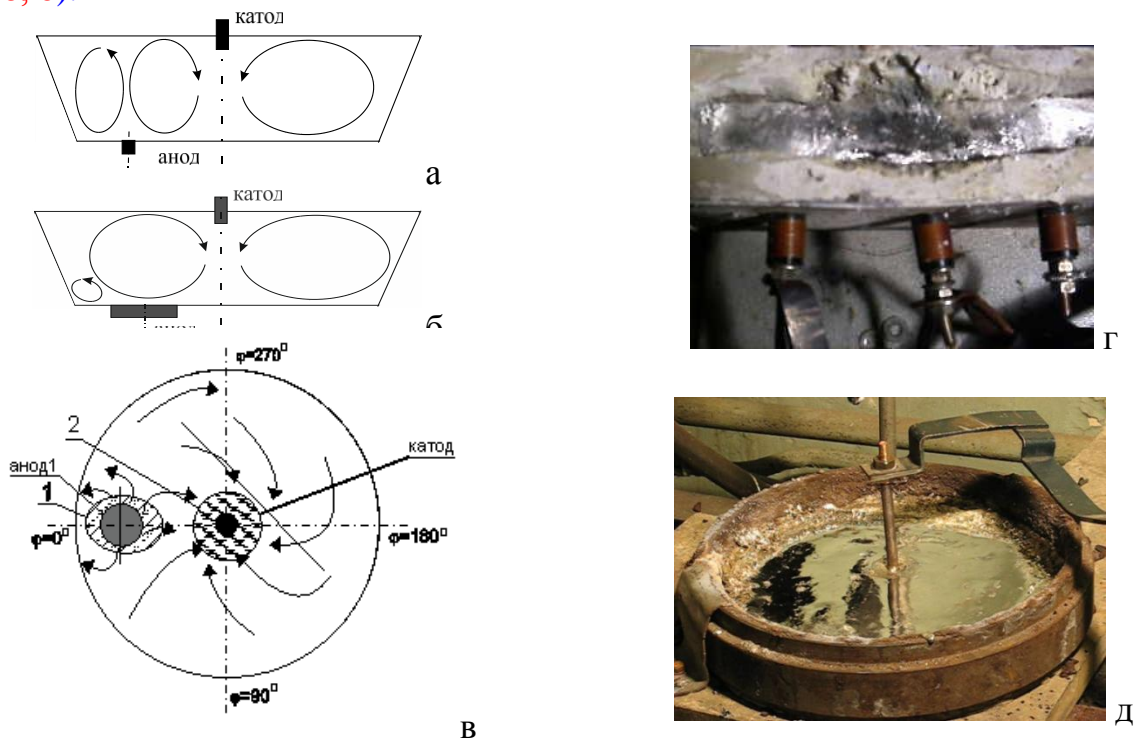


Рисунок 3.8 – Характер течения металла в ванне ДППТ с одним смещенным подовым электродом от оси ванны: а – схема течения в меридиональной плоскости ванны при $d_a = d_k$; б – схема течения в меридиональной плоскости ванны при $d_a \gg d_k$; в – схема течения на свободной поверхности расплава при $d_a = d_k$; г, е – фотографии меридиональной и свободной поверхности ванны во время эксперимента в ваннах №1, 2

На свободной поверхности в случае, когда диаметры анода и катода близки между собой ($d_a \approx d_k$), интенсивность движения расплава в области расположения электродов возрастает (рисунок 3.8, в). Для случая, когда диаметр анода значительно больше диаметра катода, наблюдается течение металла, как в первом варианте при $d_a \gg d_k$ (см. рисунок 3.7, в). Практически почти по всей свободной поверхности движение расплава осуществляется к центру ванны, где наблюдается его втягивание под катод, и лишь над зоной расположения ПЭ отмечается выход металла на поверхность. В характере

движения расплава можно отметить зеркальную симметрию относительно плоскости $\varphi=0^{\circ}(180^{\circ})$ (см. рисунок 3.8, в).

Сравнивая экспериментальные данные с результатами компьютерного моделирования, полученными в п. 2.6.1, можно сделать вывод об их качественном сходстве характера и направления течения металла.

В третьем варианте подключения электродов в меридиональной плоскости, проходящей через оси анодов, наблюдаются по два вихря с каждой стороны относительно оси ванны (рисунок 3.9, а). Причем вихри, расположенные между катодом и анодом и между анодом и боковой стенкой, вращаются в противоположные стороны. Расплав выталкивается вдоль осей ПЭ на свободную поверхность, где один из потоков медленно течет к боковым стенкам и далее в сторону подины, а другой – к центру ванны, где затягивается под катод. На свободной поверхности ванны наблюдается зеркально симметричная структура потоков относительно вертикальных плоскостей $\varphi=90^{\circ}(270^{\circ})$ и $\varphi=0^{\circ}(180^{\circ})$ (рисунок 3.9, б). Слабое перемешивание имеет место в застойных областях, вблизи боковых стенок, удаленных от ПЭ.

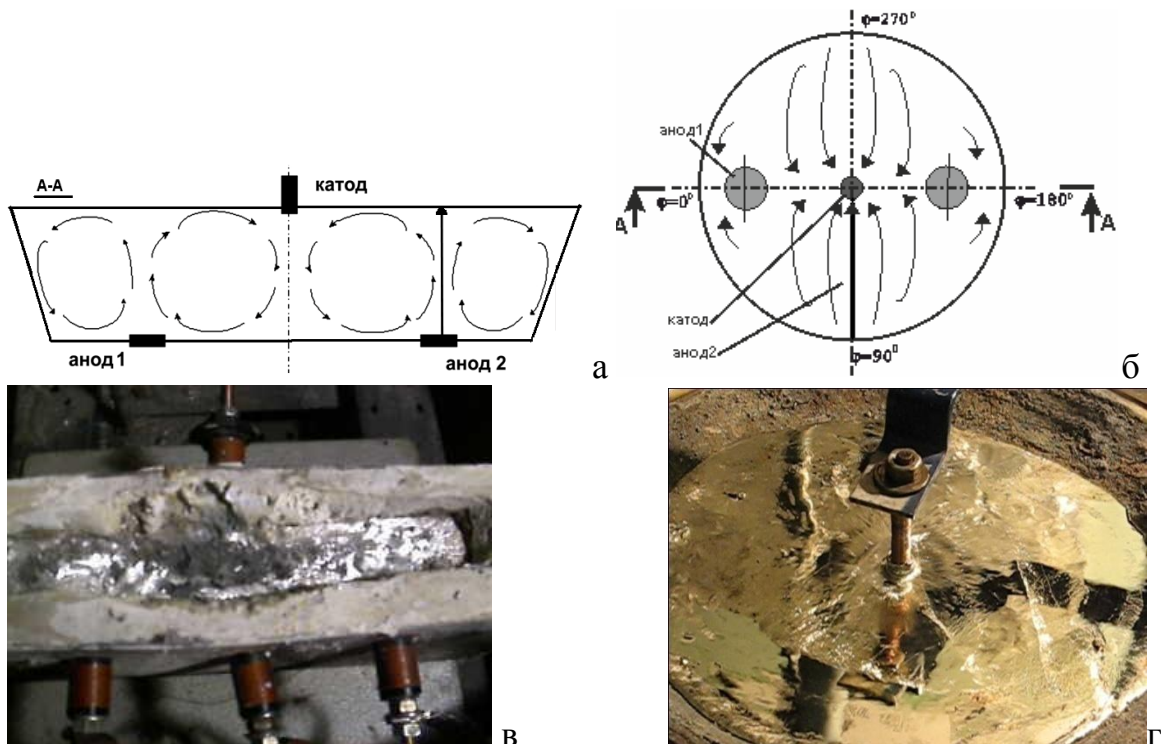


Рисунок 3.9 – Движение металла в ванне ДППТ с двумя ПЭ, установленными в одной плоскости с осью ванны: а – схема течения в меридиональной плоскости; б – схема течения на свободной поверхности; фотографии меридиональной и свободной поверхности ванны во время эксперимента в ваннах №№1, 2; \rightarrow – линия замера средней скорости расплава

В четвертом варианте подключения электродов в меридиональной плоскости, проходящей через ось ванны и ось электрода, со стороны ПЭ наблюдается два разнонаправленных вихревых потока, а с противоположной стороны - один (рисунок 3.10, а). На свободной поверхности наиболее интенсивное течение отмечается в двугранном угле, образованном плоскостями, проходящими через оси ванны и ПЭ. При этом направление вектора скорости течения расплава зависит от азимутальной координаты φ . В характере течения имеет место зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось ванны перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ $\varphi = 45^\circ$ ($\varphi = 225^\circ$) (рисунок 3.10, б). Выявлено, что застойные зоны наблюдаются вблизи угловой координаты ($\varphi = 225^\circ$).

Пятый вариант подключения. В меридиональной плоскости, проходящей через ось анода и ось ванны, наблюдается образование трех разнонаправленных замкнутых контуров потоков разной величины (рисунок 3.11, а). На свободной поверхности ванны установлена зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось ванны перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ $\varphi = 45^\circ$ ($\varphi = 225^\circ$) (рисунок 3.11, б). Следует отметить, что при увеличении смещении оси катода от осей ПЭ размеры застойных зон уменьшаются.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами характера поведения расплава, полученными на основе компьютерного моделирования распределения ОЭМС (см. рисунок 2.27).

В шестом варианте подключения подовых электродов в меридиональной плоскости наблюдается интенсивное струйное течение под электродами (рисунок 3.11) и отмечаются застойные зоны. При одинаковых диаметрах анода и катода ($d_a \approx d_k$) расплав движется вдоль их осей, при этом происходит образование разнонаправленных замкнутых потоков между катодом и анодом и анодом и боковой стенкой ванны (рисунок 3.12, а). При подключении анода большого диаметра ($d_a \gg d_k$), как и в предыдущих случаях, расплав движется вдоль осей электродов от анода к катоду, но наблюдается один замкнутый контур (рисунок 3.12, б).

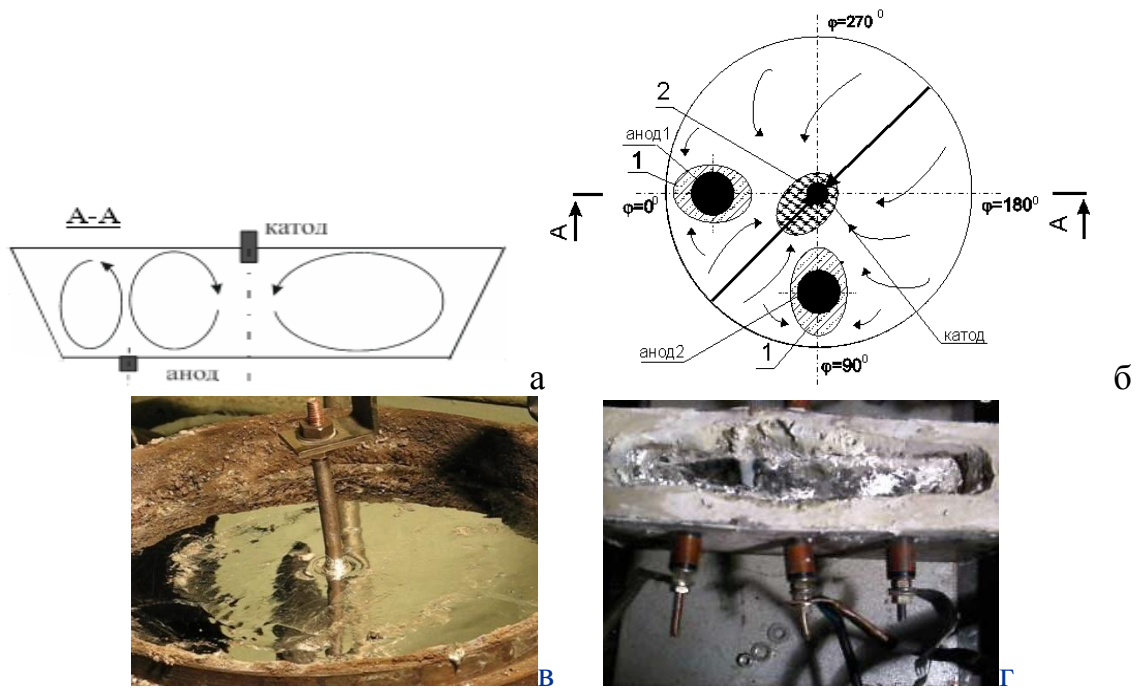


Рисунок 3.10 – Характер течения расплава на свободной поверхности: а – схема течения в меридиональной плоскости ванны, проходящей через оси катода и ПЭ; б – схема течения на свободной поверхности; в, г – фотографии меридиональной и свободной поверхности ванны во время эксперимента в ваннах № 1, 2; 1 – область всплытия расплава на поверхность; 2 – область затягивания расплава вглубь ванны; \rightarrow – линия замера средней скорости расплава



Рисунок 3.11 – Характер течения расплава при смещении катода от оси ванны: а – схема течения в меридиональной плоскости, проходящей через оси катода и анода; б – схема течения на свободной поверхности; в – фотографии свободной поверхности ванны во время эксперимента в ваннах №1: 1 – область всплытия расплава на поверхность; 2 – область затягивания расплава вглубь ванны; \rightarrow – линия замера средней скорости расплава

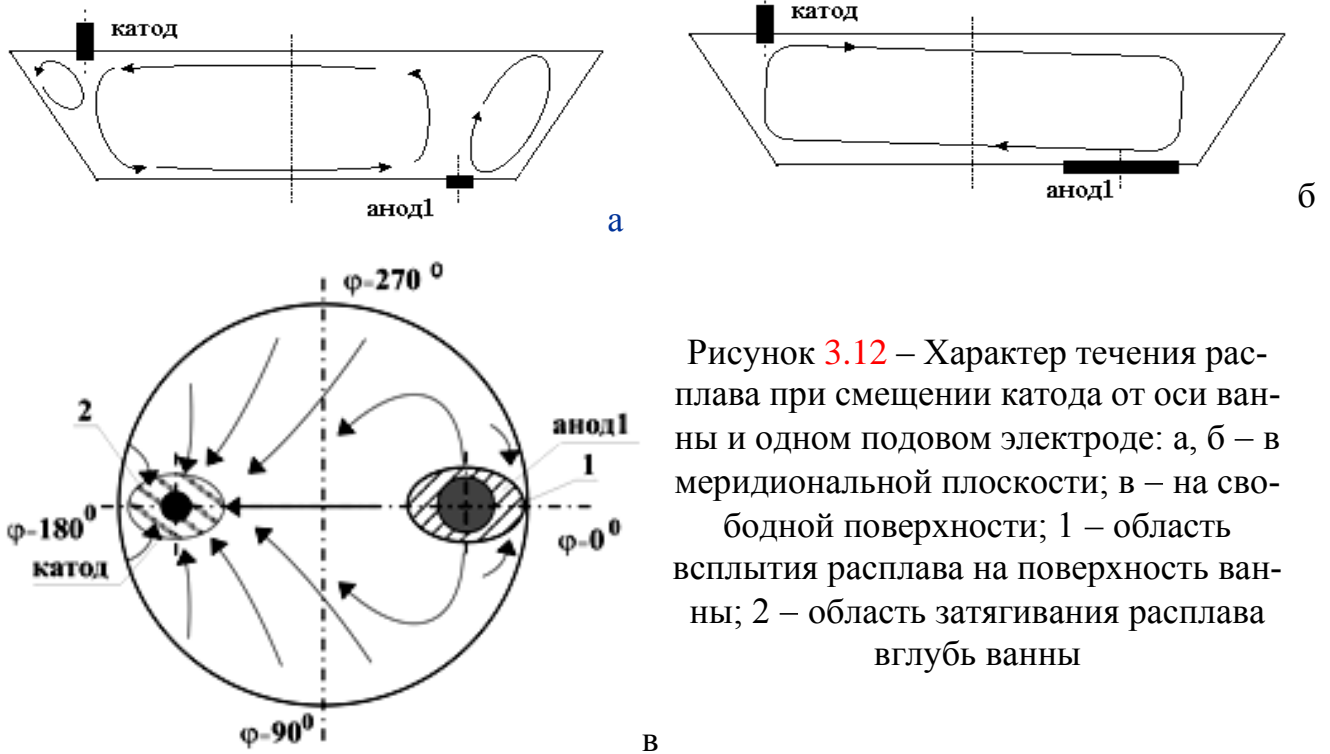


Рисунок 3.12 – Характер течения расплава при смещении катода от оси ванны и одном подовом электроде: а, б – в меридиональной плоскости; в – на свободной поверхности; 1 – область всплытия расплава на поверхность ванны; 2 – область затягивания расплава вглубь ванны

На свободной поверхности наиболее заметные течения фиксировались в местах установки катода, в области над расположением анода в плоскости $\varphi = 0^\circ$ (или $\varphi = 180^\circ$) в направлении размещения катода (рисунок 3.12, в). Слабое движение отмечалось около стенок ванны. При достижении противоположной стенки ванны потоки растекаются к ее боковым стенкам или к оси ванны, а затем вновь набегает на поверхности электродов. Можно отметить, что с увеличением расстояния между катодом и анодом скорость течения металла между ними снижается. В характере течения расплава фиксировалась зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось ванны и оси катода и анода (см. рисунок 3.12, в).

3.5. Результаты экспериментальных исследований по оценке параметров электровихревых течений в ванне расплава

При количественных измерениях посредством видеосъемки определяли время прохождения частицы шлака по поверхности расплава t , далее находили среднюю скорость движения расплава как $V = S/t$, где V – скорость расплава, мм/с; S – пройденное частицей расстояние, мм; t – время, с. Путь и время определяли визуально по результатам видеосъемки. Линии замера скорости показаны стрелками на рисунках 3.7, в; 3.9, а, б; 3.10, б; 3.11, б. Погрешность измерений оценивалась, исходя из того, что длительность одного видеокadra составляла около 1/30 с.

При расчете использовались следующие данные: радиус ванны по поверхности жидкого металла $R_g=125$ мм. Для вариантов 1, 3, 4 расстояние $L=R$. Для варианта 5 расстояние от стенки ванны до медного стержня составило $L=230$ мм; расстояние от электрода до медного стержня $-L=150$ мм. Полученные данные анализировались методом метрологической обработки экспериментальных данных прямых измерений [131].

Перед началом эксперимента с горизонтальной поверхности ванны металлическим скребком удалялся шлак. Остаточные частицы шлака, отличающиеся по цвету от расплава олова, служили «маячками» для определения скорости течения расплава олова. Дополнительно в качестве «маячков» использовались частицы графита. Эксперимент снимали на видеокамеру.

В проведенных экспериментах относительная погрешность измерений скорости движения расплава складывалась из суммарной погрешности определения расстояния и времени перемещения неметаллических частиц

$$\varepsilon = \varepsilon_s + \varepsilon_t,$$

где $\varepsilon_s = \Delta L/L$, ΔL – абсолютная погрешность измерения расстояния, 1 мм,

$\varepsilon_t = \Delta t/t$, Δt – абсолютная погрешность измерения времени, 1/30 с.

Относительная погрешность измерения расстояния составила 0,8%, а относительная погрешность измерения времени зависела от величины измеряемого временного интервала.

Анализ кадрового просмотра видеосъемки ванны №1 показал, что под медным стержнем (катодом) расплав затягивается вглубь ванны, а над ПЭ наблюдаются «бурунчики» (всплытие расплава на поверхность). При этом его минимальная скорость зафиксирована у боковых стен ванны, а максимальная – в областях над ПЭ и под катодом. Выяснено, что средняя скорость течения расплава на зеркале металла зависит от расположения катода и подовых электродов.

В таблице 3.3 приведены экспериментальные и расчетные данные по определению средней скорости движения расплава для вариантов подключения № 1, 3–5.

Установлено, что минимальные значения средней скорости наблюдаются для расположения катода и ПЭ по варианту №1. Максимальные величины скорости (50,0 см/с) отмечаются для варианта № 5 с наружной стороны двугранного угла, образованного осями катода и ПЭ (см. рисунок 3.11, б). На биссектрисе внутри дву-

гранного угла скорость падает на ~20%. Характер течения металла и средние скорости для варианта № 4 близки с вариантом № 3. Достаточно большие средние скорости наблюдаются в меридиональной плоскости для варианта № 3, над ПЭ они составляют 133 см/с (см. рисунок 3.9, а).

Таблица 3.3 – Экспериментальные и расчетные данные

Номер варианта (рисунок)	Число ПЭ, шт.	Угол между электродами, град	Ось медного стержня совпадает с осью ванны	Экспериментальные и расчет. данные			
				Эксперимент		Расчет	
				Перемещение частицы металла на расстояние S , см	Время t , с	Средняя скорость V , см/с	Относительная погрешность, %
1 (см. рисунок 3.7, в)	1	–	Да	12,5	0,57	21,9	8,1
3 (см. рисунок 3.9, а)	2	180	Да	4,0	0,03	133	100
3 (см. рисунок 3.9, б)	2	180	Да	12,5	0,30	41,7	10,0
4 (см. рисунок 3.10, б)	2	90	Да	12,5	0,27	46,3	11,1
4 (см. рисунок 3.10, б)	2	90	Да	12,5	0,30	41,7	10,0
5 (см. рисунок 3.11, б)	2	90	Нет	23,0	0,57	40,4	5,26
5 (см. рисунок 3.11, б)	2	90	Нет	15,0	0,30	50,0	10,0

Исходя из масштаба скорости для промышленной пятитонной ДППТ, можно получить характерные значения скорости движения стального расплава по ее поверхности. Так, при прохождении тока через каждый ПЭ по 3 кА средние скорости движения расплава при разных токоподводах к ванне составляют 5-12 см/с.

Посредством физического моделирования исследован характер ЭВТ расплава по ванне ДППТ при различном положении катода с одним и двумя подовыми электродами при прохождении через них одинаковых токов. Определена схема течения расплава на свободной поверхности ванны и в меридиональной плоскости, проходящей через ось ванны и оси подовых электродов.

Экспериментально установлено, что характер ЭВТ зависит от места установки

катода и количества ПЭ.

Получено, что при смещении катода, работающего в режиме заглубления до 0,8 радиуса ванны от оси симметрии ванны, распределение ОЭМС происходит по всей меридиональной плоскости как при подключении одного анода, смещенного от оси ванны, так и двух, за счет увеличения расстояния между осями электродов. Это приводит в движение большую область металла, позволяет минимизировать застойные зоны и улучшить условия перемешивания расплава.

Для усиления интенсивности перемешивания металла и возможности управления течением металла по ванне на подине печи необходимо размещать не менее двух ПЭ. Максимальные скорости движения металла наблюдаются на поверхности ванны вблизи катода и в областях, расположенных на краях ПЭ, минимальные – на боковых стенках ванны. Установлено, что для ПЭ, расположенных под углом $\Delta\varphi = 180^0$, а также для ПЭ, размещенных под углом $\Delta\varphi = 90^0$, при прохождении через аноды одинаковых токов на поверхности ванны отмечается симметрия потоков относительно плоскости, проходящей через ось ванны и перпендикулярно прямой, соединяющей центры ПЭ. Такая же картина наблюдается, если катод находится в плоскости симметрии анодов.

Получены оценки средней скорости движения металла в ванне при токоподводах, включающих в себя катод и один или два анода, на свободной поверхности и в меридиональной плоскости при прохождении через ПЭ одинаковых токов.

Установлено, что при размещении одного ПЭ по оси ванны на свободной поверхности практически отсутствует азимутальное течение и наблюдаемое радиальное течение имеет минимальную среднюю скорость среди рассматриваемых вариантов. Следовательно, такая схема наименее рациональна.

При переходе от одного к двум подовым электродам значения средних скоростей на свободной поверхности ванны увеличиваются примерно на 35 % и возрастают еще на 6 % в результате смещения катода относительно центра ванны. За счет повышения расстояния между ПЭ и пятна дуги наклонные к горизонту токи дают «эффект более глубокой ванны», при котором увеличивается длина прохождения тока между ПЭ. В результате в электровихревых течениях начинают участвовать бОльшие объемы металла, в том числе и из ранее малоподвижных слоев.

3.6. Результаты экспериментальных исследований кондукционного воздействия на металл

3.6.1. Исследование воздействия внешнего магнитного поля на токонесущую жидкую ванну (с использованием раствора поваренной соли в воде)

Для изучения движения жидкости в магнитном поле была создана экспериментальная установка (рисунок 3.13), ее геометрические характеристики приведены в таблице 3.5, схема модельной ванны – на рисунке 3.14. В качестве ванны использовалась пластиковая емкость по форме подобной ванне ДППТ. В качестве модельной жидкости использовался раствор поваренной соли, который содержал в 100 г воды примерно 25 г NaCl. Электрический ток к жидкости подводили через металлический стрежень (катод), размещенный по оси ванны и погруженный в раствор на 2–3 мм. В качестве анода, имитирующего подовый электрод, использовалась круглая металлическая пластина. Причем на подине ванны размещались четыре ПЭ – один по оси ванны и три – под центральным углом 90^0 относительно друг друга на расстоянии 40 мм от оси ванны.

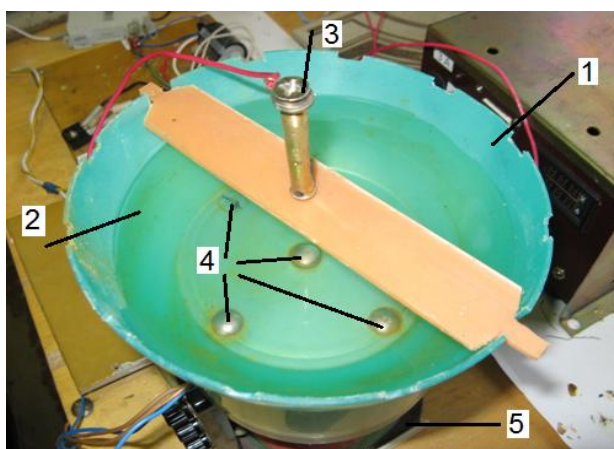


Рисунок 3.13 – Общий вид экспериментальной установки: 1 – пластиковая ванна; 2 – водной раствор поваренной соли; 3 – катод; 4 – подовые электроды; 5 – электромагнит

Под ванной устанавливали электромагнит, представляющий собой катушку с сердечником, на которую подавали постоянный электрический ток, получаемый с использованием ЛАТРа и двухполупериодного выпрямителя. Напряженность магнитного поля измеряли магнитометром ИМАГ-400Ц, имеющего максимальную погрешность $\pm 1\%$.

Определим параметры S и N и их соотношение по формулам (3.8) и

(3.11).
$$\frac{N}{S} = \frac{H \cdot L}{I}$$
 - соотношение электромагнитных сил под действием внешнего и собственного магнитного поля, где L – диаметр ванны.

Таблица 3.4 – Геометрические параметры экспериментальной установки

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр ванны, мм	$D_в$	140
Диаметр подины, мм	$d_в$	100
Диаметр ванны по жидкости, мм	$D_{жс}$	129
Высота ванны, мм	$h_в$	40
Диаметр катода, мм	$d_к$	5
Угол откоса ванны, мм	φ_0	60
Расстояние между осями подовых электродов и ванны, мм	$L_1 = L_2 = L$	40
Диаметры подовых электродов, мм	$d_{a1} = d_{a2}$	15
Угловая координата осей подовых электродов, мм	φ	0; 90; 180
Ток через подовый электрод	I_1	0–4
Высота ванны с водой, мм	$h_{жс}$	26

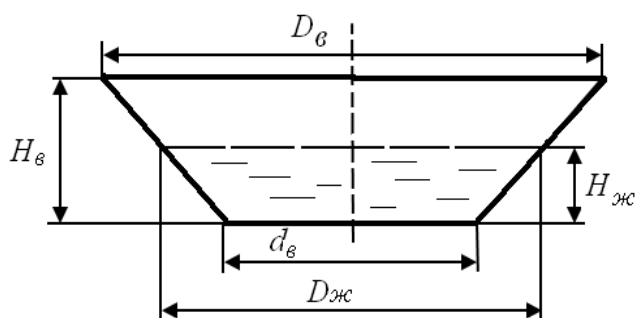


Рисунок 3.14 – Схема модельной ванны

Основные теплофизические свойства жидких материалов оригинала и модели приведены в таблице Д.2 (Приложение Д), результаты расчета соотношения масштаба и критерии подобия для модели и оригинала сведены в таблице 3.5. Данные, относящиеся к оригиналу, записываются со штрихом.

Таблица 3.5 – Условия подобия и значения полученных масштабов

Параметр	Обозначение	Жидкая сталь (0,3% С)	Раствор соли в воде при 20 ⁰ С
	N	$1,377 \cdot 10^{10}$	3674
	N/S	$7,44 \cdot 10^6$	$7,45 \cdot 10^6$
	H'	5,40E-04	2,03E+03
Напряженность внешнего магнитного поля, А/м	H	3,049	44000
Диаметр ванны по поверхности жидкости, м	L	3,049	0,129
Масштаб скорости расплава	$M_w = W'/W$	0,0368	
Геометрический масштаб	$M_L = L'/L$	18,60	

Проведено измерение внешнего магнитного поля, создаваемого электромагнитом, вблизи подины (при отсутствии жидкости) на расстоянии 10 мм от сердечника и вблизи свободной поверхности раствора поваренной соли для разных токов. Получены зависимости напряженности магнитного поля в различных точках ванны и на разном расстоянии от сердечника электромагнита (рисунок 3.15).

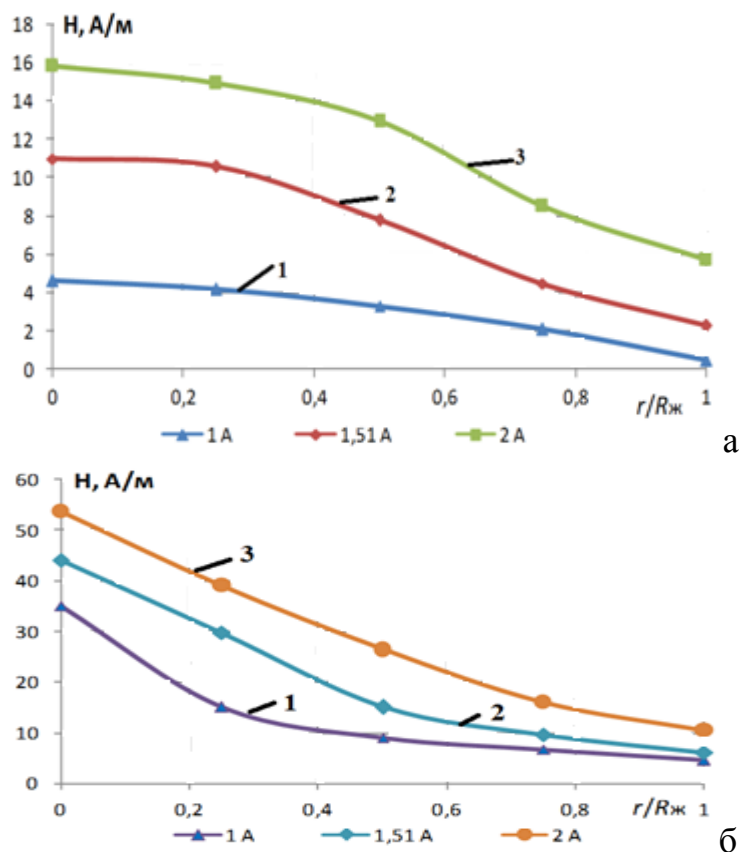


Рисунок 3.15 – Напряженность магнитного поля: а – вблизи свободной поверхности жидкости; б – на подине (расстоянии ~10 мм от сердечника) при разных токах через электромагнит

Была проведена серия экспериментов, в которых изучалось движение жидкости при включении, выключении и изменении направления внешнего магнитного поля при различных комбинациях подключения ПЭ. Определено, что при включении магнитного поля возникает круговое движение в горизонтальной плоскости. Раствор соли движется горизонтальными слоями, сначала в противотоке между верхним и нижним электродом. Затем нижнее течение сливается с верхним, и вращение жидкости происходит за счет более сильного верхнего течения в одном направлении. При смене направления магнитного поля происходит небольшая остановка жидкости, а затем ее движение меняется на противоположное. Течение в областях вблизи боковых стенок сначала идет в противоположном направлении, а затем тоже меняет направление (рисунок 3.16). При

отключения тока или магнитного поля течение раствора постепенно затухает.

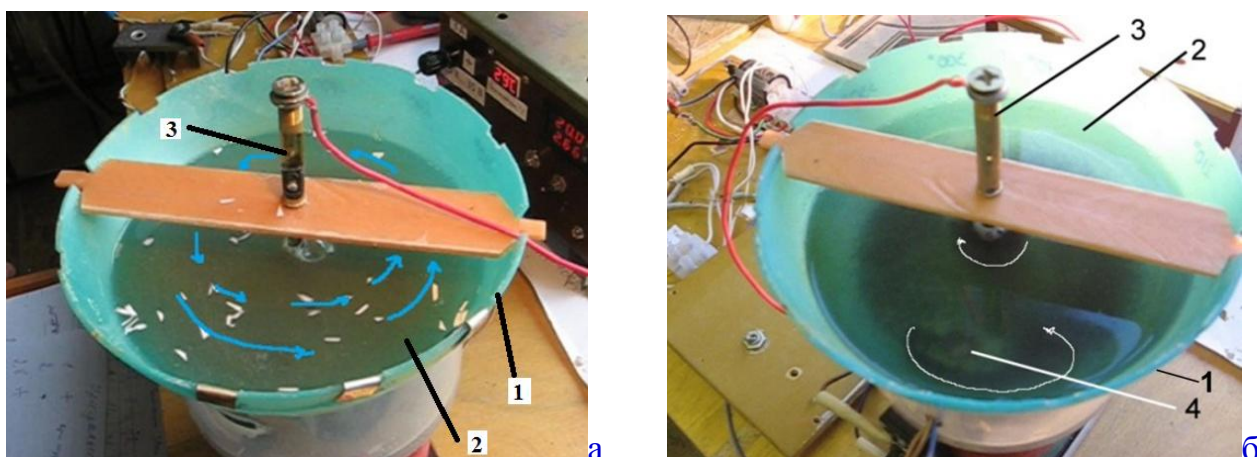


Рисунок 3.16 – Движение жидкости в ванне: а – б – при подключении одного бокового подового электрода: 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – катод; 4 – анод; \longrightarrow – направление движения

Установлено, что при подключении центрального ПЭ при включенном магнитном поле наблюдается активное движение раствора соли в области центра ванны, которое захватывает примерно до $3/4$ площади свободной поверхности ванны. Оставшаяся часть, застойная зона, имеет форму кольца и уменьшается по мере увеличения тока.

При подключении одного смещенного ПЭ застойная зона шириной ≈ 1 см наблюдается между стенкой ванны и рабочим ПЭ, ее площадь не меняется при изменении направления магнитного поля.

В обоих случаях движение под катодом и над анодом идет противоходом.

Внешнее магнитное поле, имеющее продольную составляющую относительно оси рабочего участка, может посредством силового взаимодействия с пропускаемым электрическим током приводить к азимутальной закрутке жидкости и генерации вторичных течений уже в меридиональной плоскости. Эти вторичные вихри вращаются в противоположную сторону относительно ЭВТ и ослабляют его влияние на процессы тепломассопереноса.

Визуально было установлено, что скорость вращения для серии экспериментов со смещенным ПЭ значительно больше, чем в экспериментах с подключением центрального ПЭ при одинаковых токах, проходящих по ванне.

Посредством видеосъемки проведена оценка скорости в разных точках поверхности жидкости от центра ванны для центрального и смещенного ПЭ. Изучены скорости течения электролита от радиуса жидкой ванны при разных токах и положениях

ПЭ (рисунок 3.17). Получено, что при подключении одного ПЭ максимальные скорости течения жидкости наблюдаются на расстоянии $0,5r/R_{ж}$. Причем при включении смещенного ПЭ характер течения не меняется, а скорость возрастает на 30–40%. При увеличении тока, подаваемого на электромагнит, до 3,8 А характер движения остался прежним.

При смещенном подовом электроде в ванне наблюдается вращение двух вихрей. Первый под катодом, а второй – над ПЭ. Причем второй вихрь, как более слабый, сначала возрастает, а затем постепенно уменьшается в размерах, и движение в ванне определяется первым вихрем. С увеличением магнитного поля застойная зона вблизи боковых стенок уменьшается. На поверхности ванны максимальная скорость течения наблюдаются на половине расстояния между катодом и анодом и между анодом и боковой стенкой.

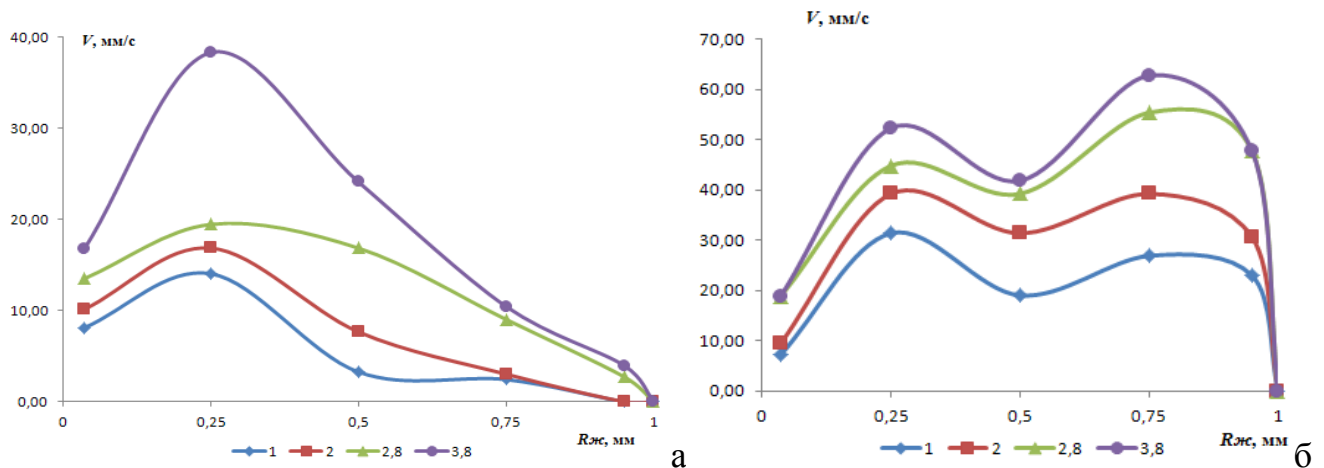


Рисунок 3.17 – Зависимость скорости течения электролита от радиуса жидкой ванны, для разных токов: а – центральный подовый электрод; б – смещенный подовый электрод

На основании изложенных во 2 главе результатов физического и компьютерного моделирования кондукционного воздействия внешнего магнитного поля на токонесущую жидкую ванну был проведен сравнительный анализ скорости течения электролита при разных режимах подключения подовых электродов.

На рисунке 3.18 представлены результаты распределения скорости течения жидкости по ванне при установившемся режиме с центральными катодом и анодом и при смещении токоподводящих электродов от оси ванны. В первом случае можно рекомендовать размещать загрузочное окно на корпусе в любом удобном месте (рисунок 3.18, а). При смещении катода или анода от оси ванны загрузочное окно следу-

ет размещать в секторе $0-180^{\circ}$ С напротив смещенного подового или графитированного электродов (рисунок 3.18, б, в).

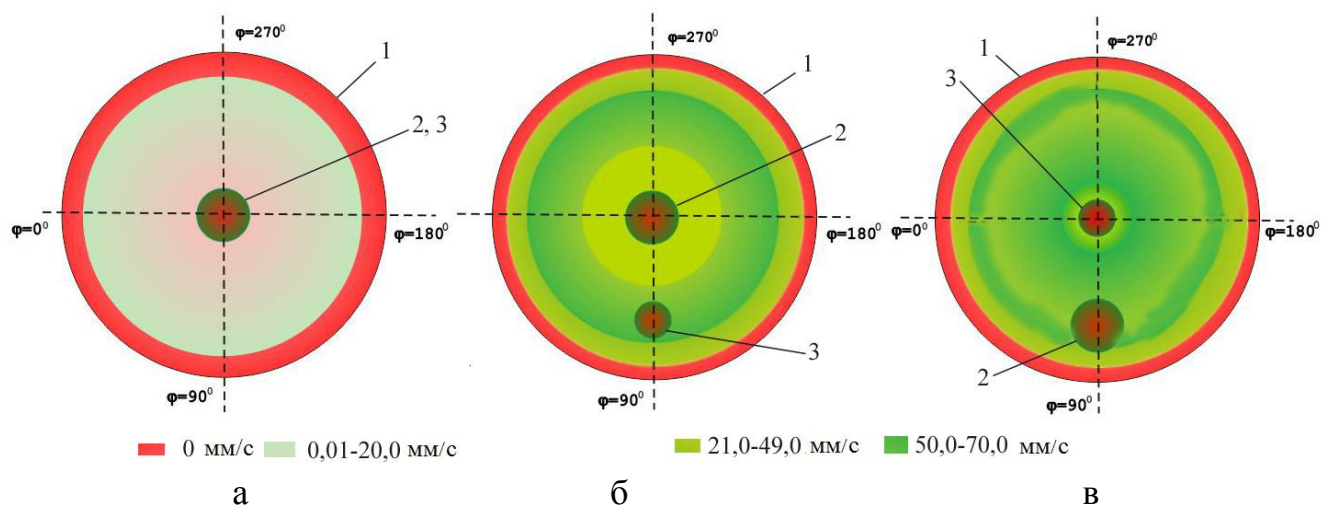


Рисунок 3.18 – Схема распределения течений по ванне: а – ДППТ с центральным анодом и катодом; б – ДППТ с центральным катодом и смещенным анодом; в – ДППТ с центральным анодом и смещенным катодом; 1 – корпус печи; 2 – застойная зона; 3 – графитированный электрод; 4 – подовый электрод

Таким образом, установлено, что при воздействии на токонесущую жидкость вертикального магнитного поля возникает ее азимутальная закрутка. Направление вращения меняется при смене полярности тока или при изменении направления внешнего магнитного поля. Установлено, что при смещении подового электрода на расстояние $4/5$ радиуса подины скорость течения жидкости на поверхности ванны возросла примерно в 2 раза, а застойная зона вблизи боковых стенок ванны сокращается на 70%.

3.6.2. Исследование воздействия внешнего магнитного поля на токонесущую жидкую ванну (с использованием расплава олова)

Экспериментально изучалось взаимодействие токонесущего расплава с внешним вертикальным магнитным полем. Для этого на боковую стенку корпуса плавильной ванны наматывали токоподводящий кабель, содержащий шесть витков. Полученная катушка имела внутренний диаметр 36 см (рисунок 3.19). Обмотку последовательно включали между источником питания и подовыми электродами по схеме, показанной на рисунке 3.5, в.

В данных экспериментах производилось совместное кондукционное и электро-вихревое воздействие на расплав, но ток от силового источника питания не подавался, поэтому чистые ЭВТ были незначительными. Визуально было видно, что более

существенным и значимым является кондукционное воздействие. Именно с этим связаны выбранные параметры катушки.

Подключение подовых электродов осуществлялось по одному из следующих вариантов (ось катода во всех вариантах совпадала с осью ванны):

1) один подовый электрод, ось которого совпадает с осью ванны (рисунок 3.20, а, б);

2) один подовый электрод, ось которого не совпадает с осью ванны (рисунок 3.20, в, г);

3) два подовых электрода, оси которых находятся в одной плоскости с осью ванны (угол между электродами $\Delta\varphi = 180^\circ$) (рисунок 3.20, д, е).

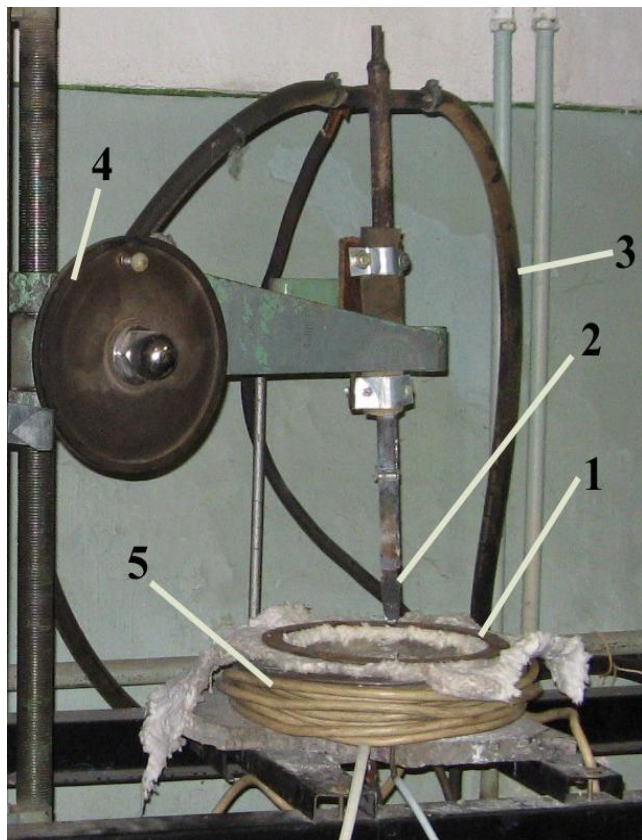


Рисунок 3.19 – Установка для изучения кондукционного перемешивания:

1 – плавильная ванна №1; 2 – графитовый электрод; 3 – водяное охлаждение катода; 4 – механизм перемещения электрода; 5 – катушка

катушку согласно схеме на рисунке 3.5, в.

В экспериментах исследовалось кондукционное перемешивание металла под действием тока порядка 100 А. Хотя этот ток меньше, чем используемый в экспериментах с ЭВТ, визуально было установлено, что возникающие течения в металлической ванне более существенны. Это объясняется результатами компьютерного моделирования, которые показывают, что вертикальная составляющая внешнего магнитного поля существенно больше аналогичного собственного магнитного поля, возникающего за счет растекающегося тока по ванне.

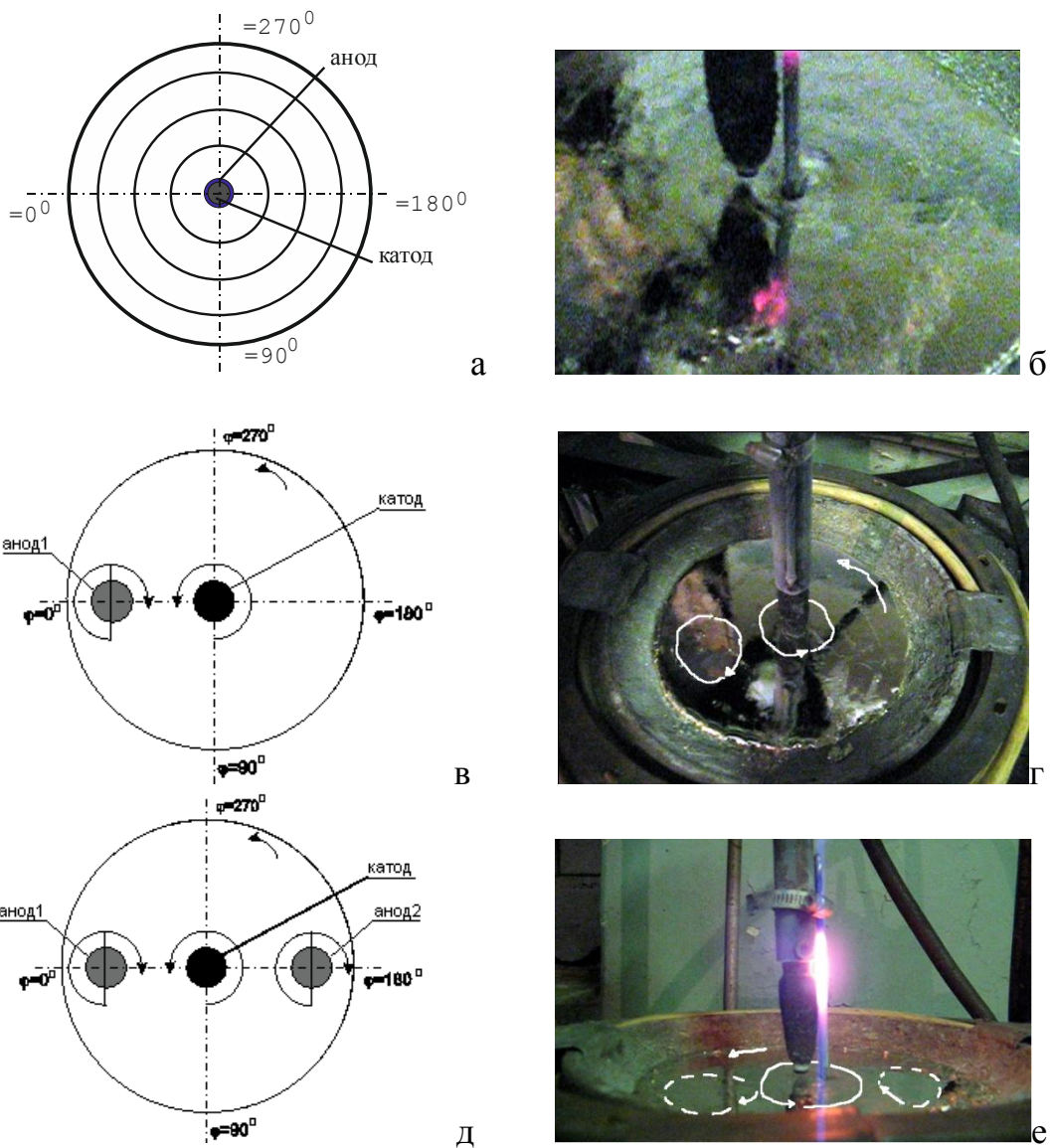


Рисунок 3.20 – Характер течения металла в модельной ванне ДППТ на ее свободной поверхности при кондукционном воздействии на расплав: а, б – один ПЭ, ось которого совпадает с осью ванны; в, г – один ПЭ, ось которого не совпадает с осью ванны; д, е – два ПЭ, оси которых находятся в одной плоскости с осью ванны

В первом варианте при наблюдении поверхности расплава отмечалось волновое течение от стенок ванны к катоду. Для остальных случаев зафиксировано движение расплава под катодом против часовой стрелки, а над подовыми электродами на поверхности расплава – по часовой стрелке, а также наблюдалось течение по спирали от стенок ванны под катод. При смене полярности обмоток катушки общая картина характера течения оставалась прежней, а направление движения металла в области катода и над подовыми электродами менялось на противоположное. При этом с увеличением расстояния от катода в сторону боковых стенок ванны скорость движения металла на свободной поверхности снижалась. Следует отметить, что в ходе экспериментов для

всех вариантов скорость движения расплава олова значительно возросла, по сравнению с экспериментами без подключения катушки.

Таким образом, выяснено, что для снижения времени перемешивания и повышения гомогенизации расплава более эффективно использовать два подовых электрода, расположенных под углом 90° относительно друг друга или смещение катода от оси ванны. Скорость течения расплава при кондукционном и электровихревом воздействии значительно возросла, по сравнению с использованием только влияния электровихревых течений. Можно рекомендовать и ведение процесса перемешивания в режиме заглужения катода. При этом он может быть выполнен из неграфитированного материала.

3.7. Выводы по третьей главе

1. С использованием теории подобия и размерности определены критерии подобия, определяющие характер электровихревых течений в ванне ДППТ, с помощью которых получены геометрические и технологические масштабы для моделирования перемешивания металла в ванне пятитонной сталеплавильной печи.

2. На основе методов физического моделирования спроектирована и создана экспериментальная лабораторная установка. Проведены качественные исследования характера течения в ванне и оценочные количественные измерения скорости расплава на свободной поверхности ванны с учетом положения подовых электродов и катода.

3. Установлено, что характер электровихревых течений в ванне ДППТ зависит от схемы токоподвода, а именно от количества подовых электродов, их диаметра и места расположения, а также от места размещения катода.

4. Выяснено, что максимальные скорости течения расплава на поверхности ванны наблюдаются как при электровихревом, так и при кондукционном способе перемешивания при значительном смещении катода от оси ванны и подключении двух подовых электродов, смещенных от оси ванны и расположенных под углом 90° при прохождении через них одинаковых токов.

5. На физической модели исследован характер течения токонесущего расплава в жидкой ванне, возникающий под действием внешних и собственных магнитных полей. Установлено, что скорость и характер течения металла зависят от количества подовых электродов и их расположения, а также от размещения графитированного элект-

трода. Установлено, что с точки зрения перемешивания ванны более эффективно использовать два подовых электрода вместо одного при одном и том же токе. При подключении двух подовых электродов значения средних скоростей на свободной поверхности ванны увеличиваются примерно на 35 % и возрастают еще на 6 % в результате смещения катода относительно оси ванны.

6. Показано, что при наличии в ДППТ только одного подового электрода существует возможность интенсификации процесса перемешивания за счет режима заглубления катода, смещенного от оси ванны и выполненного из неграфитированного материала или (и) смещения подового электрода от оси ванны.

7. Определено, что при использовании кондукционного перемешивания при смещении подового электрода от оси ванны скорость течения токонесущей жидкости на свободной поверхности ванны возрастает примерно в 2 раза, при этом застойная зона вблизи боковых стенок ванны уменьшается на 70 %.

8. Даны рекомендации по положению загрузочного окна на корпусе печи при использовании ДППТ с центральным подовым электродом, а также и при смещении графитированного или подового электродов от оси ванны.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОЙ ВАННЫ С ТОКОНЕСУЩИМ РАСПЛАВОМ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ

4.1. Рекомендации по применению электровихревого и кондукционного перемешивания в металлургических агрегатах

Процесс перемешивания жидкой ванны позволяет ускорить процесс легирования, рафинирования металла, предотвращает локальный перегрев, препятствует возникновению вихрей, разрушающих футеровку подины печи и ПЭ. Были разработаны практические рекомендации по повышению эффективности перемешивания жидкой ванны с помощью электровихревого и кондукционного перемешивания.

Предложена конструкция ДППТ, позволяющая повысить производительность печи за счет интенсификации перемешивания металла и его рафинирования путем установки второго сводового электрода (катода), размещения на подине четырех ПЭ и дополнительных регуляторов тока. На конструкцию печи получен патент на полезную модель (приложение А) [133]. Плавку предлагается вести в трех режимах, где процесс перемешивания расплава металла осуществляется путем выборочного подключения подовых электродов и второго катода (рисунок 4.1).

В ДППТ реализуются три периода плавки. В первый период плавления шихты на графитированный (первый катод) и один из ПЭ подают напряжение, зажигают дугу и плавку ведут при максимально высоких напряжении и длине дуги и минимальном токе. Чтобы сократить время плавления шихты, генерируют вторую дугу и подают напряжение на второй сводовый электрод. Это обеспечивает работу печи на повышенной мощности. По мере накопления жидкого металла на подине осуществляется периодическое переключение тока со второго катода на первый и ПЭ с возбуждением в расплаве поля ОЭМС. Это приводит к интенсивному перемешиванию жидкой ванны.

Применение нагрева дополнительной дугой от второго катода с перераспределением тока на первый уменьшает нагрузку на работающий анод. Это повышает стойкость подины, увеличивает межремонтный период. Использование комбинированного

плавления шихты двумя дугами с одновременным электромагнитным перемешиванием позволяет стабилизировать тепловой и электрический режимы печи, уменьшает колебания активной мощности.

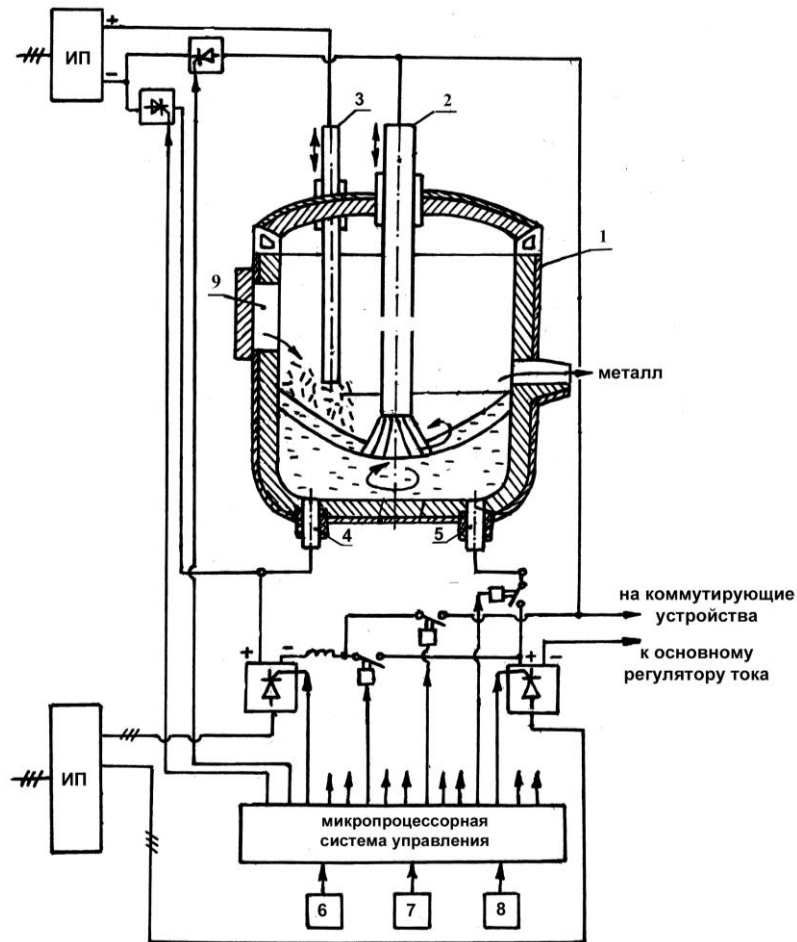


Рисунок 4.1 – Дуговая печь постоянного тока: 1 – ДППТ; 2 – графитированный электрод; 3 – второй сводовый электрод; 4, 5 – подовые электроды; 6 – блок задания переключения тока; 7 – блок задания коммутации регуляторов тока; 8 – блок согласования работы регуляторов тока; 9 – загрузочное окно; ИП – источник питания

Во время второго периода плавки шихта внутри «колодца» расплавлена, и дуга привязывается к расплаву металла. Для увеличения скорости движения металла и его перемешивания в этот период возможна реализация трех режимов работы. При первом режиме дополнительно подключается второй ПЭ. Это позволяет при фиксированной мощности, вводимой в печь, в два раза увеличить ток, протекающий через металл, создать дополнительный электромагнитный поток от горизонтальных составляющих тока, протекающего между первой парой ПЭ и катодом, а также от токов, протекающих по токоподводу.

При втором режиме включается вторая пара ПЭ. Все основные регуляторы тока

подключаются к расплаву и графитированному электроду параллельно, при этом возрастает вертикальная и горизонтальная составляющие тока в расплаве.

Третий режим второго периода плавки реализуется при организации четырех замкнутых цепей (по числу ПЭ) между графитированным электродом и каждым из четырех ПЭ. При этом основные регуляторы тока по сигналам, которые поступают с микропроцессорной системы управления, осуществляют периодическое последовательное изменение тока в электрических цепях в одном направлении по типу «бегущего» поля. В этом случае организуется направленное вращательное движение расплава с образованием вихревой воронки в виде вогнутого зеркала расплава. Для усиления эффекта «бегущего» потока металла может использоваться замыкание коммутирующих устройств. Рабочая часть графитированного электрода располагается в начале второго периода внутри «колодца». Это предотвращает обрушение кусков шихты на графитированный электрод, «закорачивание» дуги и экранируется вогнутым зеркалом металла на заключительном этапе второго периода плавки.

В итоге повышается эффективность нагрева металла за счет работы на удвоенной или учетверенной силе тока и уменьшенном напряжении на дуге. Плавка проводится при достаточно большой длине дуги, при этом доля энергии, поступающей в расплав, достигает 60–80 % и при интенсивном перемешивании под воздействием магнитогидродинамических эффектов, уменьшающих локальные перегревы расплава.

В третий период плавки осуществляется рафинирование расплава. На зеркало металла через загрузочное окно подают рафинирующий шлак, который сначала интенсивно плавится за счет перегрева металла и далее перегревается дугой после расплавления шлака. Второй катод погружают в слой шлака и пропускают через него ток от дополнительного источника электропитания. Второй сводовый электрод может иметь положительную полярность, противоположную полярности графитированного электрода, за счет чего происходят эффективная электрошлаковая обработка металла и его интенсивное перемешивание со шлаком, который может вращаться в направлении противоположном вращению металла. Такая организация процесса рафинирования сокращает время обработки, повышает ее эффективность и способствует увеличению производительности печи.

Для стабильной работы ДППТ параметры плавки заранее вводят в блоки задания переключения тока, задания коммутации и согласования основных и дополни-

тельных регуляторов тока. На основании данных программ микропроцессорная система управления осуществляет управление регуляторами тока и исполнительными механизмами коммутирующих устройств, изменяя токи и схемы подключения.

Таким образом, перемешивание расплава металла в ДППТ осуществляется за счет взаимодействия тока, протекающего через металл, с собственным магнитным полем. При этом скорость теплопередачи от дуги к расплаву увеличивается пропорционально росту силы тока, что позволяет снизить удельную мощность плавки и повысить ее производительность.

Предложен способ ведения электроплавки в ДППТ с полым графитированным и двумя подовыми электродами, в котором управление перемешиванием расплава осуществляется путем наложения низкочастотных и высокочастотных пульсаций на общий ток дуги и сдвига фаз между токами, проходящими через подовые электроды (рисунок 4.2). На способ получен патент на изобретение (приложение А) [134].

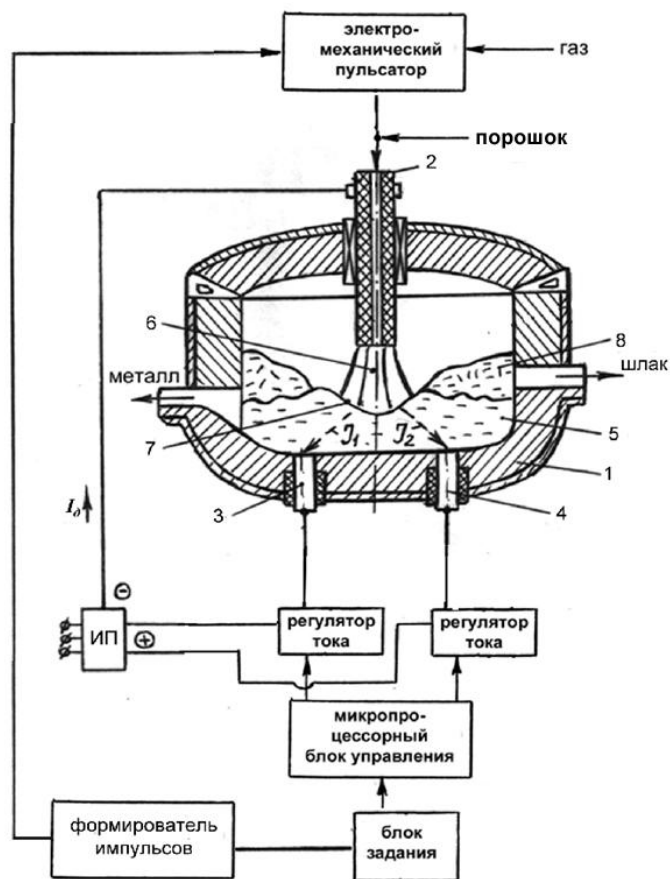


Рисунок 4.2 – Дуговая печь постоянного тока с полым электродом:
1 – ДППТ; 2 – полый графитированный электрод; 3, 4 – подовые электроды;
5 – расплав; 6 – дуга; 7 – лунка; 8 – шихта

После загрузки шихты через полый графитированный электрод подают пульси-

рующий поток газа. Плавление шихты осуществляют дугой, которая возникает при протекании тока через две замкнутые электрические цепи. Рафинирование расплава проводят наведением шлака на его поверхности, а легирование – введением лигатур. Нагрев, рафинирование и легирование расплава проводят одновременно с его перемешиванием, осуществляемым двумя способами.

Первый способ. Перемешивание расплава происходит при возникновении двух замкнутых цепей (по числу ПЭ). Первую цепь образуют источник электропитания, сводовый электрод, дуга, расплав металла, один подовый электрод, токоподвод и регулятор тока. Во вторую цепь подключают второй подовый электрод. При наличии более двух ПЭ получается несколько замкнутых электрических цепей, изменение тока в них производится со сдвигом фаз в каждой цепи относительно других.

В соответствии с выбранной частотой (f_u), регуляторы изменяют токи, проходящие через ПЭ (I_1, I_2) в течение всего времени горения дуги, в том числе во время расплавления шихты и образования и перемешивания расплава металла, с амплитудой изменения $I_{1\max} - I_{1\min}$ и $I_{2\max} - I_{2\min}$ (рисунок 4.3). Управление изменением тока на регуляторах тока осуществляется с помощью микропроцессорного блока управления. В каждый момент времени ток, протекающий через жидкий металл, равен сумме токов, проходящих через подовые электроды ($I_d = I_1 + I_2$). Токи, взаимодействуя с собственным магнитным полем, возбуждают поле ОЭМС, которое периодически меняется во времени, в соответствии с изменением тока на ПЭ. Меняющееся поле ОЭМС приводит к возникновению в жидкой ванне ДППТ периодически изменяющихся электровихревых течений, которые существуют в течение всего времени горения дуги и обеспечивают перемешивание.

Во втором способе перемешивания осуществляется наложение пульсаций на общий ток дуги, предпочтительно с крутым фронтом импульса, например прямоугольным. Изменение частоты (f_d) и амплитуды пульсаций общего тока ($I_{d\max} - I_{d\min}$) производится регуляторами тока. Пульсирующая дуга оказывает электродинамическое переменное силовое воздействие на металл, складывающееся из скоростного напора потока плазмы, действующего на поверхности лунки в дуговом пятне, и ОЭМС, что в сумме обеспечивает дополнительное перемешивание расплава металла.

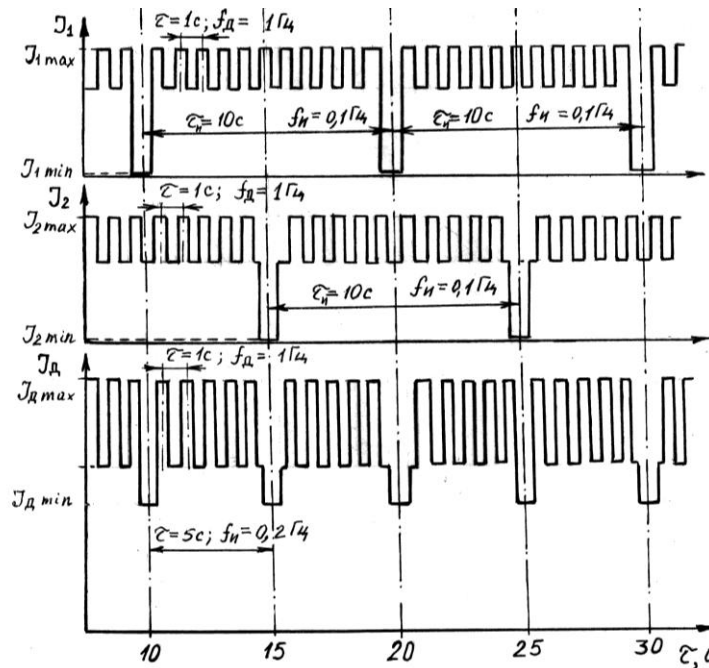


Рисунок 4.3 – Диаграммы изменения основных параметров электроплавки

Для повышения производительности ДППТ путем интенсификации перемешивания плавление, нагрев, рафинирование и легирование металла осуществляют поддержанием частот пульсаций тока дуги (f_d) десятикратной частоте (f_u) изменения величины тока в замкнутых цепях между сводовым электродом и подовыми электродами $f_d = 10f_u$. При этом наблюдаются резонансные явления от совпадения частот f_d и стохастического совпадения с ними гармонических составляющих токов I_1 и I_2 . Это приводит к взаимодействию объемных и поверхностных потоков расплава, генерируемых тремя способами, с получением интенсификации процесса перемешивания расплава металла. В зависимости от емкости печи, геометрии ванны ДППТ, электрофизических свойств металла, номинального значения величины общего тока I_d , максимально допустимой величины длительности одного периода изменения тока τ_n (см. рисунок 4.3), протекающего через расплав, подбирается оптимальная частота f_u изменений тока I_d в электрических цепях и частоты пульсаций тока f_d . Поддержание оптимальной частоты осуществляется в диапазоне 0,1–10 Гц. Регулирование частот изменения тока в замкнутых электрических цепях, пульсаций тока и плазмообразующего газа предпочтительно в синфазном режиме их изменения. Амплитуда пульсаций общего тока $I_{dmax} - I_{dmin}$ может быть задана в диапазоне 30–80 % от его номинального значения.

Предлагаемый способ не только повышает производительность печи за счет равномерного по всему объему перемешивания расплава металла, но и устраняет образо-

вание устойчивых локальных вихрей над подовыми электродами, что уменьшает износ ПЭ и футеровки подины, увеличивает время межремонтной кампании.

Еще одной проблемой при перемешивании расплава является организация его движения. Решение этой задачи предлагается в полезной модели (приложение А) [91].

Предложена конструкция ДППТ, в которой подина выполнена в виде кольцевой электропроводной каменной кладки. По внешней стороне корпуса печи расположен кольцевой токоподвод, внешнее магнитное поле к которому предлагается создавать шиной токоподвода, выполненной в виде кругового витка, плоской спирали Архимеда, цилиндрической винтовой линии или пространственной спирали Архимеда, с возможностью ввода по ее оси сердечника из ферромагнитного материала (рисунок 4.4). Предлагаемая ДППТ обеспечивает возможность управления движением расплава в различные периоды плавки и снижать влияния ЭВТ в области ПЭ.

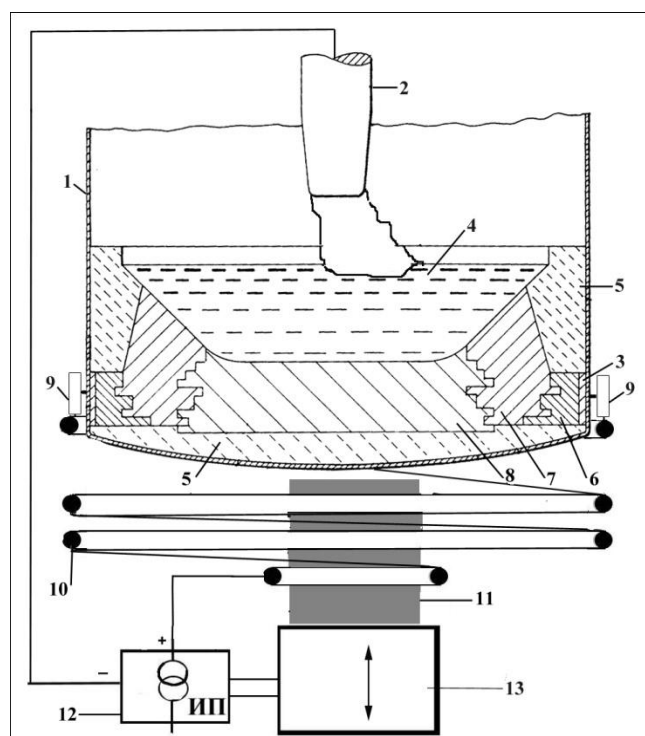


Рисунок 4.4 – Дуговая печь постоянного тока: 1 – корпус; 2 – катод; 3 – кольцевой токоподвод; 4 – расплав; 5 – огнеупорная каменная кладка; 6, 7 – кольцевая часть кладки; 8 – набивная масса; 9 – медные вставки; 10 – токоподвод; 11 – ферромагнитный сердечник; 12 – источник постоянного тока

Кондукционное перемешивание металла в ванне ДППТ возникает за счет взаимодействия протекающих через расплав токов с внешним магнитным полем, обеспечивая равномерность тепловой нагрузки на корпус и подину печи. Интенсивность электромагнитного перемешивания по ходу плавки регулируется вводом ферромаг-

нитного сердечника в токоподвод и позволяет разрушать ЭВТ, возникающие в области кольцевой части кладки, образующих ПЭ.

Ферромагнитный сердечник может быть выполнен с возможностью перемещения как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях (рисунок 4.5) [92]. Причем перемещение ферромагнитного сердечника по горизонтали под подиной дает возможность его использования для повышения напряженности магнитного поля в разных областях ванны, то есть управления движением расплава для его равномерного перемешивания и сброса «вихрей» в районе ПЭ. В результате улучшается однородность расплава по всему объему ванны, увеличивается срок службы футеровки за счет разрушения устойчивых ЭВТ, возникающих в области ПЭ. Кроме того, перемещение ферромагнитного сердечника меняет интенсивность горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля в районе столба дуги, позволяя воздействовать на столб дуги: центрировать его по оси ванны или наклонять к боковой стенке печи, в зависимости от технологических задач.

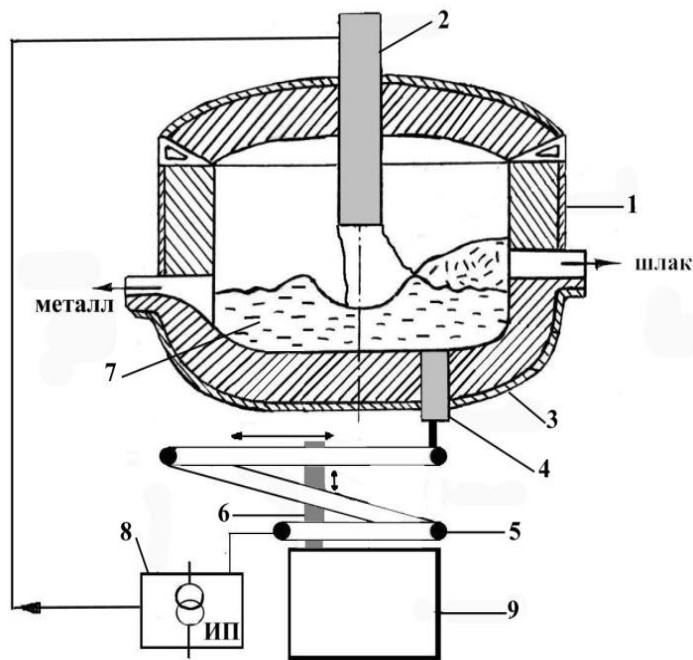


Рисунок 4.5 – Электродуговая печь постоянного тока: 1 – корпус; 2 – катод; 3 – подина; 4 – подовый электрод; 5 – токоподвод; 6 – ферромагнитный сердечник; 7 – расплав; 8 – источник питания постоянного тока; 9 – электропривод

Таким образом, в результате взаимодействия катода, кольцевого подового электрода и ферромагнитного сердечника осуществляется управление движением расплава в различные периоды плавки и снижается влияние электровихревых течений в области подового электрода.

4.2. Совершенствование управления перемешиванием металла в ванне дуговой печи постоянного тока за счет характера изменения токов, протекающих через подовые электроды

Современные ДППТ с точки зрения управления являются сложными объектами. В период плавления шихты и рафинирования расплава металла происходит наиболее интенсивное перемешивание жидкой ванны для получения химически однородного расплава с равномерным распределением температуры по всему объему ванны. При этом скорость циркуляции металла должна быть минимальной в области футеровки и ПЭ и максимальной на границе шлак-металл.

Циркуляция расплава в ДППТ с двумя подовыми электродами происходит за счет возникновения электровихревых течений, вызываемых ОЭМС, которые существенно зависят от силы токов, т.к. обусловлены взаимодействием тока, подводимого к расплаву от сторонних источников, с собственными магнитными полями.

На основе математических моделей проведен анализ составляющих ОЭМС в области ПЭ. Установлено, что в ДППТ с одним ПЭ, смещенным от оси ванны, на свободной поверхности жидкой ванны над ПЭ образуются два противоположно направленных вихря, а в меридиональной плоскости вблизи ПЭ малого диаметра – интенсивные вихри. Таким образом, возникающие ЭВТ в печи становятся причиной разрушения футеровки подины и ПЭ, в результате снижается время межремонтного периода.

В работах [111–116] рассмотрено, что происходит в ванне ДППТ в результате изменения токов, которые проходят через подовые электроды.

Одна из главных причин вымывания футеровки связана с возникающими интенсивными электровихревыми течениями вблизи ПЭ. Для ДППТ с двумя ПЭ рассмотрены способы управления перемешиванием металла и «сброса» вихрей. На существующих печах они реализуются с помощью цифрового микроконтроллера, позволяющего осуществлять управление силовыми токами. Наиболее распространенный вариант такого управления – это уменьшение тока с периодом T через каждый токоподвод к ПЭ, со сдвигом фаз $\psi = 180^0$ между ними, до минимального значения I_{\min} (рисунок 4.6, а).

Предложена схема управления токами, протекающими через ПЭ (рисунок 4.6, б). Ее особенностью является увеличение тока через один подовый электрод при одно-

временном его уменьшении через другой (это в среднем эквивалентно изменению тока через каждый ПЭ удвоенной величины), что усиливает «подавление» вихрей в районе подовых электродов. Кроме этого, сумма токов, проходящих через ПЭ, в любой момент времени является величиной постоянной ($I_1 + I_2 = const$), следовательно, в режиме перемешивания ванны остается неизменной и тепловая мощность дуги, а значит, не меняется производительность печи.

Для подавления вихрей в области ПЭ предлагается использовать токи, изменяющиеся по заданному периодическому закону со сдвигом фаз ψ . При прохождении через ванну пульсирующих токов $I_{a2} = f(\tau)$, $I_{a1} = f(\tau - \psi)$, ($I_{a1}I_{a2} > 0$), которые подчиняются периодическому закону $f(\tau)$ со сдвигом фаз ψ и периодом T , в каждой ее точке будет наблюдаться периодическое изменение электрического и магнитного поля.

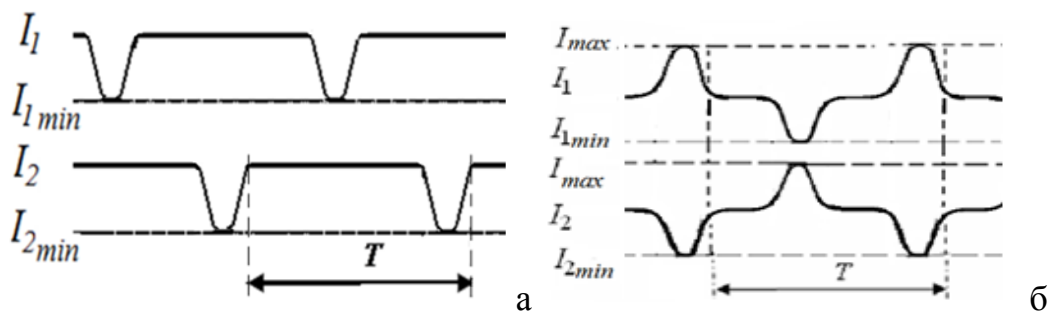


Рисунок 4.6. Существующий (а) и предлагаемый (б) характер изменения токов через два подовых электрода при работе ДППТ в режиме перемешивания металла

Посредством компьютерного моделирования установлено, что при фиксации одного из токов ($I_{a2} = 0$) напряженность электрического и магнитных полей меняется во времени, причем это изменение происходит одновременно (синфазно) во всех точках жидкого расплава пропорционально изменяющемуся току I_1 [113]: $E_{\Pi} \sim I_{a1}$, $H_{\Pi} \sim I_{a1}$.

Оценим мгновенное значение ОЭМС в данной точке ванны в зависимости от времени. По принципу суперпозиции считаем, что при изменении обоих токов результирующая напряженность электрического и магнитного полей:

$$E_{\Pi} = k_1(\tau) + k_2 f(\tau - \psi), \quad H_{\Pi} = k_3(\tau) + k_4 f(\tau - \psi), \quad (4.1)$$

получим характер зависимости проекции ОЭМС:

$$F_{II} = c_0 f^2(\tau) + b_0 f^2(\tau - \psi) + a_0 f(\tau) k_2 f(\tau - \psi), \quad (4.2)$$

где $k_1, k_2, k_3, k_4, a_0, b_0, c_0$ – функции, зависящие от рассматриваемой проекции и координаты точки.

Используем оценку ОЭМС в зависимости от токов, протекающих через ПЭ, для произвольной точки ванны ДППТ определим проекцию среднеинтегральной ОЭМС как

$$\bar{f}(\psi) = \frac{c}{T_0} \int I^2(\tau) d\tau + \frac{b}{T_0} \int I^2(\tau - \psi) d\tau + \frac{a}{T_0} \int I(\tau) I(\tau - \psi) d\tau, \quad (4.3)$$

где a, b, c – функции, которые зависят от рассматриваемой проекции и координаты точки.

Первые слагаемые выражения (4.2) являются постоянными величинами, значит, зависимость $f(\psi)$ обуславливается только третьим членом. Следовательно, в зависимости среднеинтегральной ОЭМС от сдвига фаз между токами основную роль играет функция

$$\bar{f}(\psi) = \int_0^{2\pi} I(\tau - \psi) I(\tau) d\tau. \quad (4.4)$$

В качестве примера рассмотрим T-периодическую функцию изменения токов

$$I(\tau, \psi) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \cdot (\omega\tau - \psi) - \frac{\pi}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \cdot \left((2n) \cdot \left(\frac{2\pi\tau}{T} - \psi \right) \right)}{(2n-1)(2\pi+1)}. \quad (4.5)$$

График функции (4.4) приведен на рисунке 4.7, среднее и действующее значение тока $\bar{i} = 0,25$ и $I_D = 0,5$ кА, соответственно. Ее особенностью является то, что часть периода функция имеет нулевое значение.

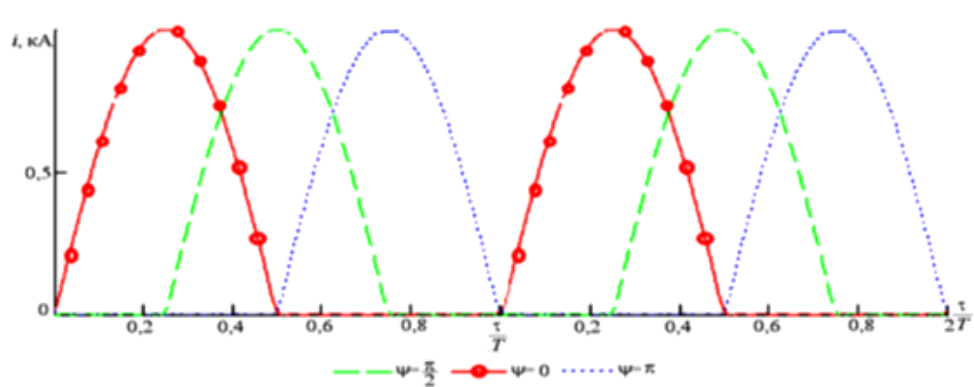


Рисунок 4.7 – Зависимость токов от времени при разной начальной фазе ψ для функции (4.5)

Для функции изменения токов (4.5) приведена зависимость среднеинтегрального значения радиальной проекции ОЭМС в зависимости от сдвига фаз (рисунок 4.8). Установлено, что в данной точке между ПЭ направление F_r меняется на противоположное. Использование на практике аналогичных функций и наложение на них дополнительного условия $I_{a1} + I_{a2} = \text{const}$ позволяет управлять не только его направлением, но и интенсивностью течения расплава, при этом полезная электрическая мощность ДППТ остается постоянной.

Однако такое управление возможно только при наличии двух ПЭ. При использовании ДППТ с одним подовым электродом влиять на ЭВТ без отключения тока дуги невозможно.

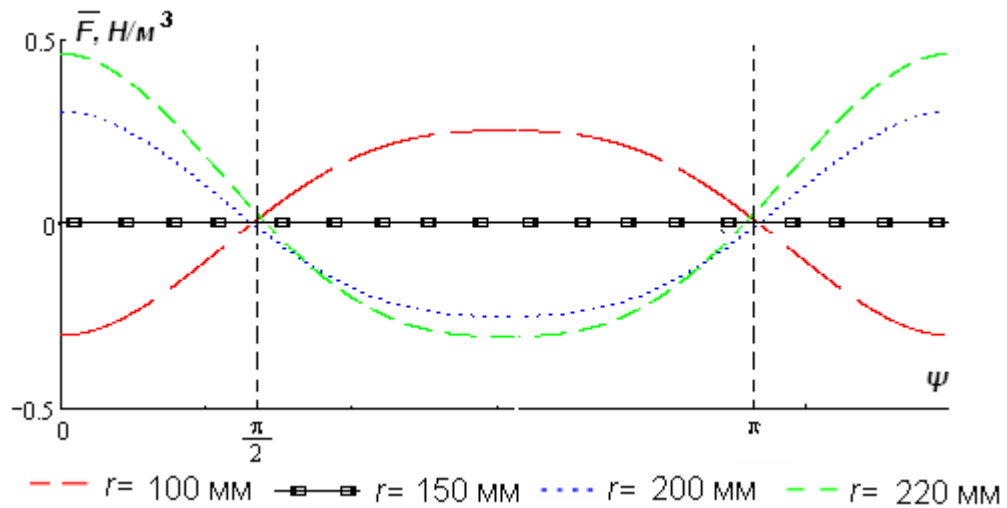


Рисунок 4.8 – Поведение средней радиальной ОЭМС от сдвига фаз в разных точках между ПЭ при пульсирующих токах по функции (4.5)

Изучена зависимость азимутальной F_φ , осевой F_z и радиальной F_r составляющих ОЭМС от соотношения токов $\bar{I} = I_{a1} / I_{a2}$, протекающих через ПЭ при разных углах φ ($d_{a1} = d_{a2} = 300$ мм) (рисунок 4.9) [113].

Установлено, что все проекции сил одного порядка и некоторые силы меняют свое направление. Установлено, что зависимости проекций ОЭМС от тока ложатся на параболу с достоверностью аппроксимации $R^2 = 1$. Например, при $\varphi = 0$ имеем:

$$F_\varphi = -I^2 + 1,65I - 0,276;$$

$$F_z = -0,35\bar{I}^2 + 0,31\bar{I} - 0,36;$$

$$F_r = -0,01\bar{I}^2 + 0,83\bar{I} - 1,25.$$

Это численно подтверждает характер зависимостей (4.1).

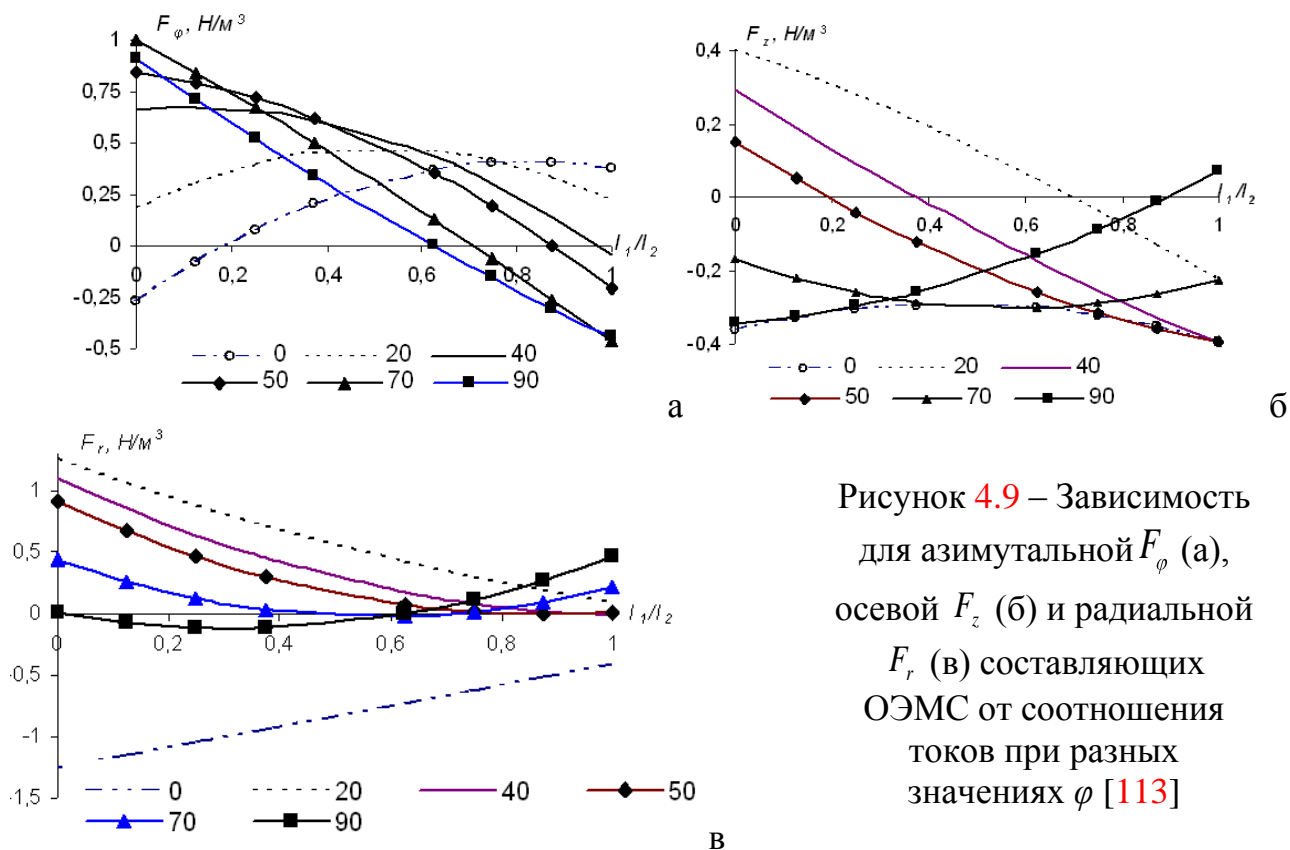


Рисунок 4.9 – Зависимость для азимутальной F_φ (а), осевой F_z (б) и радиальной F_r (в) составляющих ОЭМС от соотношения токов при разных значениях φ [113]

Таким образом, обоснована теоретическая возможность управления интенсивностью и направлением течения расплава между двумя подовыми электродами, а значит, и во всей ванне ДППТ за счет изменения соотношения токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через ПЭ. С помощью компьютерного моделирования показан характер поведения ОЭМС в произвольной точке ванны в зависимости от периодических токов, протекающих через ПЭ. Установлено, что только при наличии сдвига фаз пульсирующих токов могут появиться условия для появления бегущих электромагнитных полей и ОЭМС, порождающих устойчивые ЭВТ, которые, в свою очередь, способствуют перемешиванию расплава. Обоснована теоретическая возможность управления течением расплава в ванне ДППТ с двумя ПЭ. Выяснено, что, изменяя соотношение токов, которые проходят через ПЭ, можно управлять направлением и интенсивностью ОЭМС, а следовательно, и ЭВТ расплава.

4.3. Расчет экономической эффективности при использовании токоподвода к ДППТ в виде плоской спирали Архимеда

В настоящее время предприятия России работают в условиях жесткой рыночной конкуренции, поэтому одной из задач, стоящей перед металлургической отраслью, яв-

ляется повышение эффективности работы уже установленного оборудования. Это возможно за счет совершенствования технологии и конструкции печей при невысоких капитальных затратах и быстрой окупаемости вложенных средств.

В качестве одного из способов модернизации производства, для малотоннажных печей, работающих на постоянном токе, например в литейном производстве, является изменение вида токоподвода с прямой шины на шину, выполненную в виде плоской спирали Архимеда. Как показано во второй главе такая конструкция токоподвода наиболее перспективная из рассмотренных вариантов. Создаваемое токоподводом вертикальное магнитное поле позволит снизить негативное влияние внешних магнитных полей на поведение дуги. При смещении ПЭ от оси ванны дуга будет интенсивно перемещаться по поверхности ванны не вызывая локальные перегревы металла. Металл в ванне приводится во вращательное движение в горизонтальной плоскости и этим повышается интенсивность кондукционного перемешивания.

Общим критерием экономической эффективности производства является получение максимальной прибыли за счет минимизации затрат времени на получение единицы продукции и минимизации затрат на материалы. Расчеты проведены по методике, предложенной в работе [135].

Рассчитаем экономическую эффективность при использовании токоподвода в виде плоской спирали Архимеда. В качестве примера проведем оценку экономических показателей ДППТ-5 производительностью 25 тыс. т жидкой стали в год.

Согласно расчетам, проведенным во второй главе, для токоподвода в виде плоской спирали Архимеда потребуется дополнительно проложить 30,2 м токопроводящей медной шины. Ее стоимость и монтаж токоподвода под подиной печи входят в статью «стоимость основных фондов». Цена за электротехническую шину ШМТ (шина медная твердая) $12 \times 120 \times 4000$ мм составляет 7250 руб. за 1 погонный метр. Стоимость промышленных электромонтажных работ – 700 руб./м.

По данным А.С. Богдановского [10], после перевода ДСП на работу на постоянный ток с ЭВТ перемешиванием в процессе эксплуатации подтверждается предположение о снижении расхода ферросплавов. Их расход в связи с уменьшением угара во многом зависит от условий плавки, правильности ведения электрического режима. Для ферросилиция, силикомарганца, ферромарганца снижение составило 8–10%; а для феррохрома и феррованадия – 14 и 33% соответственно. Перевод плавильного

агрегата позволил отказаться от динасового свода, установив водоохлаждаемый. Стойкость свода превышает 1 год.

Считаем, что наша конструкция токоподвода даст не меньший эффект при кондукционном перемешивании и приведет к снижению расходов по статьям «на легирующие элементы» на 10 % и увеличению затрат на оборудование. Исходя из этого, проведем экономический расчет.

Сведем все затраты в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Финансовые показатели работы печи до и после реконструкции за год

№ п/п	Наименование	До реконструкции	После реконструкции
1	Объем реализованной продукции, млн руб.	451,77	451,77
2	Сумма затрат на изготовление продукции, млн. руб., в том числе:	386,81	384,14
	на шихту	320	320
	на легирующие элементы	26,67	24,00
	на графитированный электрод	12,67	12,67
	на подовые электроды	10,33	10,33
	на футеровку	9,33	9,33
	на электроэнергию	3,78	3,78
	на фонд оплаты труда	2,70	2,70
	прочие (ремонт, брак и т.д.)	1,33	1,33
3	Стоимость основных фондов, млн руб., в том числе:	80	80,24
	оборудование	80	80,24
4	Стоимость оборотных средств, млн руб., в том числе:	379,27	376,60
	шихты	320	320
	легирующих элементов	26,67	24,00
	графитированных электродов	12,67	12,67
	подовых электродов	10,33	10,33
	стоимость футеровки	9,33	9,00
	прочие	0,27	0,27
5	Инвестиции на внедрение, тыс. руб.	–	240,09

Определим прибыль предприятия, которая представляет собой выраженный в денежной форме доход, полученный из разницы между выручкой от реализации продукции и затратами. Показатель прибыли П считаем по формуле

$$П = Д - И,$$

где Д – доходы; И – издержки.

Для расчетов примем П1 – прибыль без применения токоподводов новой конструкции, П2 – прибыль с применением токоподводов новой конструкции.

$$П1 = 451,77 - 386,81 = 64,96 \text{ млн руб.};$$

$$П2 = 451,77 - 384,14 = 67,63 \text{ млн руб.};$$

$$\Delta П = 67,63 - 64,96 = 2,67 \text{ млн руб.}$$

В результате проведенных мероприятий на модернизацию предприятие увеличит прибыль на 2,67 млн руб. за счет экономии затрат на легирующие элементы.

Определим рентабельность производства (относительный показатель эффективности производства, характеризующий сопоставление прибыли с затратами или используемыми ресурсами).

$$R = (\text{Прибыль} / (\text{Стоимость основных фондов} + \text{стоимость оборотных средств})) \times 100, \%$$

$$R1 = (64,96 / (80 + 379,27)) \times 100 = 14,14\%;$$

$$R2 = (65,43 / (80,24 + 376,13)) \times 100 = 14,80\%.$$

Рентабельность производства выросла с 14,14 до 14,80%.

Определим показатель фондоотдачи, который характеризует объем товарной или валовой продукции по отношению к стоимости основных фондов предприятия

$$ФО = \text{Объем реализованной продукции} / \text{основные производственные фонды}$$

$$ФО1 = 451,77 / 80 = 5,65 \text{ млн. руб.};$$

$$ФО2 = 451,77 / 80,24 = 5,63 \text{ млн. руб.};$$

$$\Delta ФО = ФО2 - ФО1 = 5,63 - 5,65 = -0,02.$$

Значение фондоотдачи показало, что новый токоподвод увеличил стоимость основных фондов предприятия на 0,02 млн руб., что привело к снижению фондоотдачи основных фондов, количество продукции при этом уменьшилось на ту же сумму. Но снижение работы оборудования носит временный характер и напрямую зависит от показателя, называемого периодом окупаемости.

Определим материалоемкость продукции (затраты сырья, материалов и других материальных ресурсов на единицу продукции).

МЕ = количество израсходованных материальных ресурсов / товарная продукция, выпущенная на предприятии

$$МЕ1 = 386,81 / 451,77 = 0,86 \text{ млн руб.};$$

$$МЕ2 = 384,14 / 451,77 = 0,85 \text{ млн руб.}$$

Материалоемкость продукции снижается на 0,01 млн руб.

Определим срок окупаемости (СО) инвестиций – время, которое потребуется предприятию на возмещение инвестиционных расходов.

$$CO = \text{Первоначальные инвестиции} / \text{среднегодовая экономия}$$

В нашем случае считаем, что прежняя система уже окупилась, поэтому считаем срок окупаемости нового проекта.

Первоначальные инвестиции (ПИ) складываются из цены на приобретенное оборудование и стоимости монтажных работ

$$PI = 7250 \times 30,2 + 30,2 \times 700 = 240090 \text{ руб.};$$

$$CO = 240,90 / 2670,0 = 0,09 \text{ год.}$$

Срок окупаемости ≈ 1 месяц. Все полученные данные сведены в общую таблицу

4.2.

Таблица 4.2 – Экономические показатели до и после реконструкции

Наименование	Без внедрения новой конструкции токоподводов	С внедрением новой конструкции токоподводов
Прибыль, млн руб.	64,96	67,63
Рентабельность, %	14,14	14,81
Фондоотдача, млн руб.	5,65	5,63
Материалоемкость, млн руб.	0,86	0,85
Срок окупаемости вложений, год.	–	0,09

Рассмотрены дополнительные расходы на приобретение и монтаж токопроводящей шины, приводящее к увеличению стоимости основных фондов. Считаем, что за счет интенсификации процесса перемешивания металла уменьшается время нахождения металла под током, а значит снижаются затраты по статье расхода легирующих элементов примерно на 10 %. Получены основные экономические показатели до и после реконструкции печи. В результате проведенных мероприятий планируемая прибыль предприятия увеличится на 2,67 млн руб. в год, срок окупаемости составит 1 месяц.

Таким образом, практически по всем показателям предлагаемый вариант конструкции токоподвода оправдывает вложенные в него средства.

4.4. Выводы по четвертой главе

1. Предложены конструкции ДППТ, позволяющие повысить производительность печи за счет интенсификации перемешивания металла и его рафинирования путем установки второго сводового электрода, размещения на подине четырех подовых электродов и дополнительных регуляторов тока.

2. Предложен способ ведения электроплавки в ДППТ с полым графитированным и двумя подовыми электродами, в котором управление перемешиванием расплава осуществляется путем наложения пульсаций на общий ток дуги и сдвига фаз между токами, проходящими через подовые электроды.

3. Предложена конструкция ДППТ с применением кондукционного перемешивания, в которой подина выполнена в виде кольцевой электропроводной каменной кладки. Внешнее магнитное поле создается шиной токоподвода, выполненной в виде кругового витка, плоской спирали Архимеда, цилиндрической винтовой линии или пространственной спирали Архимеда, с возможностью ввода по ее оси сердечника из ферромагнитного материала. Ферромагнитный сердечник может быть выполнен с возможностью перемещения как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

4. Обоснована теоретическая возможность управления интенсивностью и направлением течения расплава между двумя подовыми электродами за счет изменения соотношения токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды.

6. Установлено, что только при наличии сдвига фаз между пульсирующими токами, протекающими через подовые электроды, могут появиться условия для появления бегущих электромагнитных полей и ОЭМС, порождающих устойчивые ЭВТ, способствующие перемешиванию расплава в ванне ДППТ.

7. Рассчитан ожидаемый экономический эффект при использовании кондукционного перемешивания ванны расплава ДППТ-5 путем изменения формы токоподвода к ПЭ (изготовление его в виде спирали Архимеда), который составит 2,67 млн руб. в год, срок окупаемости – 1 месяц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализирована динамика нагрева и плавления кусков ферромарганца различного размера в зависимости от скорости его обтекания жидким металлом. Установлено, что на время расплавления кусков ферромарганца существенно влияет скорость расплава, так, при скорости 0,1 м/с время расплавления по сравнению с неподвижным металлом снижается в 6 раз, а при скорости 0,3 м/с – в 10 раз.

2. Предложена математическая модель и программный продукт по нахождению распределения напряженности магнитного поля вблизи токоподводов разной формы к подовому электроду, которые предлагается использовать при кондукционном перемешивании токонесущего металла в ванне.

3. Установлено, что для кондукционного перемешивания наиболее перспективными являются конструкции токоподводов в форме плоской спирали Архимеда, имеющей 2–3 витка, и в форме винтовой линии, содержащей 5–6 витков.

4. Установлено, что при использовании кондукционного перемешивания при смещении подового электрода от оси ванны, скорость течения токонесущей жидкости на свободной поверхности ванны возрастает примерно в 2 раза, при этом застойная зона вблизи боковых стенок ванны уменьшается на 70 %. Даны рекомендации по размещению загрузочного окна в корпусе ДППТ при смещении графитированного или подового электрода от оси ванны.

5. Предложена методика выбора конструктивных параметров двух подовых электродов и их размещения на подине ванны ДППТ для более эффективного электровихревого перемешивания жидкого металла. Для повышения интенсивности объемных электромагнитных сил наиболее рациональны следующие параметры: оси подовых электродов и ось симметрии ванны должны образовывать двугранный угол $70\text{--}100^\circ$; расстояние от оси ванны до оси подовых электродов - 0,3-0,4 радиуса подины ванны; площадь контакта подового электрода с металлом должна быть минимально возможной и определяться его тепловой работой, средней плотностью тока 0,3-0,5 А/мм² и стойкостью футеровки.

6. С помощью физической модели установлен характер течения токонесущего расплава в жидкой ванне, возникающий под действием внешних и собственных магнитных полей. Показано, что скорость и характер течения металла зависят от количе-

ства подовых электродов и их расположения, а также от места размещения графитированного электрода. Установлено, что при одном и том же токе дуги, с точки зрения перемешивания ванны более эффективно вместо одного использовать два подовых электрода. Применение двух подовых электродов увеличивает значения средних скоростей на свободной поверхности ванны примерно на 35 %, и скорости возрастают еще на 6 % в результате смещения оси катода от оси ванны на 0,2 радиуса.

7. Показано, что при наличии в ДППТ только одного подового электрода существует принципиальная возможность интенсификации процесса электровихревого перемешивания за счет его смещения на расстояние до 0,3–0,4 радиуса ванны и (или) сдвига графитированного электрода на расстояние до 0,8 радиуса ванны от ее оси. Также возможно при работе в режиме перемешивания заглубливание катода, выполненного из неграфитированного материала, в металл.

8. Обоснована теоретическая возможность управления интенсивностью и направлением течения металла в ванне ДППТ за счет изменения соотношения токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды. Предложена новая схема управления токами, протекающими через два подовых электрода. Рекомендован выбор периодических функций для пульсирующих токов, позволяющих управлять интенсивностью и направлением течения расплава в ванне.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДПТ – дуговая печь постоянного тока;

ДСП – дуговая сталеплавильная печь, работающая на трехфазном переменном токе;

ПЭ – подовый электрод;

ОЭМС – объемные электромагнитные силы;

ЭВТ – электровихревые течения;

ЭМП – электромагнитное перемешивание;

ФМн – ферромарганец;

ФС – ферросилиций;

ШТ – шаровое тело;

ШМТ – шина медная твердая.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об улучшении показателей малотоннажных дуговых сталеплавильных печей для литейного производства / С.М. Нехамин, А.Я. Стомахин, А.И. Черняк, А.Ф. Филиппов // *Металлургия машиностроения*. 2007. № 3. С. 31–36.
2. Елизаров К.А., Нехамин И.С. Многофункциональные дуговые печи малой емкости для литейных производств и исследовательских центров // *Мир металла*. 2011, апрель. С. 7–10.
3. Выбор агрегатов для выплавки стали в сталелитейных цехах / А.Ф. Миляев, С.В. Кадников, И.М. Ячиков, И.В. Портнова // *Труды VII конгресса сталеплавильщиков*. М.: Черметинформация, 2003. С. 354–357.
4. Миляев А.Ф. Проектирование новых и реконструкция действующих литейных цехов: Учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2001. 410 с.
5. Ищенко В.А., Романов О.М., Трещалин А.В. Основные направления модернизации литейных цехов заводов горношахтного оборудования // *Уголь*. 2002. № 5. 35–41.
6. Плавка чугуна в дуговых печах постоянного тока нового поколения ОАО «Курганмашзавод» / И.Д. Андреев, А.В. Афонаскин, В.С. Евсеев // *Литейное производство*. 2005. № 1. С. 27–28.
7. Малиновский В.С. Техничко-экономические результаты промышленного освоения дуговых печей постоянного тока нового поколения // *Металлургия машиностроения*. 2004. № 6. С. 9–23.
8. Украинские дуговые печи постоянного тока – прорыв к ресурсосберегающим технологиям в металлургии / В.Г. Машьянов, С.А. Саньков, Г.В. Ковалев и др. // *Литье Украины*, 2008. № 2. С. 16–19.
9. Володин А.М., Богдановский А.С., Малиновский В.С. Результаты работы печи постоянного тока ДППТУ-20 на АОТ «Тяжпрессмаш» // *Литейное производство*. 2004. № 11. С. 31–35.
10. Богдановский А.С. Опыт работы печи постоянного тока ДППТУ-20 в сталелитейном цехе на ОАО «Тяжпрессмаш» // *Металлургия машиностроения*. 2007. № 1. С. 18–24.
11. Выплавка стали в дуговой печи после перевода питания с переменного тока на постоянный / А.М. Володин, В.А. Сорокин, А.С. Богдановский и др. // *Литейное производство*. 2005. № 7. С. 21–22.
12. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного

- тока нового поколения на ОАО «Курганмашзавод» / А.В. Афонаскин, И.Д. Андреев, Н.С. Власов и др. // *Литейное производство*. 2000. № 11. С. 20–23.
13. Освоение дуговой печи постоянного тока / М.К. Закамаркин, В.И. Беспалько, В.В. Храмов и др. // *Сталь*. 2000. № 4. С. 32–34.
14. Дуговые печи постоянного тока в современном электросталеплавильном производстве / И.Ю. Зинуров, Ю.А. Гудим, В.С. Галян и др. // *Электromеталлургия*. 2005. № 10. С. 3–12.
15. Макаров А.Н. Теория и практика теплообмена в электродуговых и факельных печах, топках, камерах сгорания: монография. Ч. 1. Основы теории теплообмена излучением в печах и топках. Тверь: ТГТУ, 2007. 184 с.
16. Огороков Н.В. Электромагнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах. М.: Metallurgizdat, 1961. 176 с.
17. Поволоцкий Д.Я., Рощин В.Е., Мальков Н.В. Электрометаллургия стали и ферросплавов. М.: Metallургия, 1995. 592 с.
18. Дошкицкая А.И., Кропачев Г.П. Техничко-экономические преимущества применения электромагнитного перемешивания в электродуговых печах // *Электромагнитное перемешивание расплавленных металлов: Тр. УПИ. Сб. № 133*. Свердловск, 1963. С. 7–10.
19. Пат. 2112187 РФ, МПК F27B 3/10, H05B 7/06 Подовый электрод электропечи / В.С. Малиновский. Опубл. 27.05.1998.
20. Нехамин С.М., Крутянский М.М., Филиппов А.К. Дуговые печи постоянного тока – высокоэффективные плавильные агрегаты // *Литейщик России*, 2005. С. 25–26.
21. Об улучшении показателей малотоннажных дуговых сталеплавильных печей для литейного производства / С.М. Нехамин, А.Я. Стомахин, А.И. Черняк, А.Ф. Филиппов // *Metallургия машиностроения*. 2007. № 3. С. 31–36.
22. Повышение напряжения дуги и удаление азота путем вдувания метана при электроплавке (реф.) // *Новости черной металлургии за рубежом*. 2004. № 4. С. 44–45.
23. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. М.: Metallургия, 1975. 224 с.
24. Зубарев А.Г. Интенсификация электроплавки. М.: Metallургия, 1972. 208 с.
25. Еднерал Ф.П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. – М.: Metallургия, 1977. 488 с.
26. Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельнис М.В. Синтетический чугуn. Киев: Наукова

- думка. 1971. 160 с.
27. Об эффективности работы дуговых печей постоянного тока нового поколения при выплавке чугуна и стали / А.В. Афонаскин, И.Д. Андреев, Д.В. Князев и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова № 1. 2005. С. 26–31.
 28. Моделирование электромагнитных процессов в электродуговых печах постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина, И.В. Портнова. Магнитогорск: МГТУ, 2005. 140 с.
 29. Нехамин С.М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: Дисс... д-ра техн. наук. М., 2015. 381 с.
 30. Гинзбург И.П., Сурин В.А., Богаутдинов А.А. Массообмен в жидкой ванне и пути его интенсификации // Тепло- и массообмен в сталеплавильных агрегатах: Науч. тр. / МИСиС. 1979. № 120. С. 52–56.
 31. Оптимизация технологии плавки в дуговой печи с донной продувкой инертным газом / М.П. Гуляев, В.В. Филиппов, В.В. Эндерс и др. // Сталь. 2002. № 4. С. 55–58.
 32. Совершенствование условий энергообеспечения современного электросталеплавильного процесса / И.В. Деревянченко, Г.А. Лозин, Э.А. Шумахер и др. // Сталь. 2005. № 1. С. 45–50.
 33. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. М.: Металлургия, 1987. 256 с.
 34. Опыт использования системы DVS для донной продувки металла в условиях ЭСПЦ Молдавского металлургического завода / А.В. Юдин, И.В. Кузнецов, И.В. Деревянченко и др. // Металлург. 2007. № 10. С. 37–38.
 35. Бигеев В.А., Столяров А.М., Валиахметов А.Х. Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цехе: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 308 с.
 36. Повышение напряжения дуги и удаление азота путем вдувания метана при электроплавке (реф.) // Новости черной металлургии за рубежом. 2004. № 4. С. 44–45.
 37. Ячиков И. М. Интенсификация массопереноса в электропечах постоянного тока: Монография. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 132 с.
 38. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М.: Металлургия, 1974. 240 с.

- 39.Верте Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии. М. Металлургия, 1975. 288 с.
- 40.Экспериментальное исследование поля скоростей в осесимметричном электро-вихревом течении в цилиндрическом контейнере / Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А. и др. // Магнитная гидродинамика. 1986. № 3. С. 110–116.
- 41.Интенсификация потоков расплавленного металла в жидкой ванне при индукционном нагреве / А.С. Письменный, В.М. Баглай, А.А. Письменный // Современная электрометаллургия, 2010. № 2. С. 34–39.
- 42.Чернышов И.А. Электромагнитное воздействие на металлические расплавы. М.: Metallurgizdat, 1963. 86 с.
- 43.Пат 2132028 РФ, МПК⁶ F27D23/04, C21C7/00. Способ электромагнитного перемешивания электропроводного расплава и устройство для его осуществления / А.И. Кулинский Оpubл. 20.06.1999.
- 44.Пат. 115453 на ПМ РФ, МКИ⁷F27B3/08 Электродуговая печь постоянного тока / И.Е. Сеницын, А.М. Володин, А.К. Мусолин и др. Оpubл. 27.04.2011.
- 45.Пат. 2191335 РФ, МПК⁷ F27B3/08 Плавильная дуговая печь / С.П. Бакуменко. Оpubл. 20.12.2001.
- 46.Пат. 2190815 РФ, 2МКИ⁷ F27 D 3/08, C21C 5/52. Дуговая сталеплавильная печь постоянного тока / А.Н. Макаров, Р.А. Макаров. Оpub. 10.10.2002.
- 47.Макаров А.Н., Шимко М.Б., Зуйков Р.М. Теплообмен в одно- и четырехэлектродных дуговых сталеплавильных печах постоянного и переменного тока // Электрометаллургия, 2004. № 3. С. 12–15.
- 48.Пат. РФ 2104450, МКИ⁷ F27B 3/08, C22B 9/21. Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления / В.С. Малиновский. Оpub. 20.02.1998.
- 49.Закамаркин М.К., Липовецкий М.М., Малиновский В.С. Дуговая сталеплавильная печь постоянного тока емкостью 25 т на ПО «Ижсталь» // Сталь. 1991. № 4. С. 31–34.
- 50.Филиппов А.К., Крутянский М.М., Фарнасов Г.А. Использование электропечей постоянного тока в металлургии. // Сталь, 2002. № 1. С. 33–37.
- 51.Малиновский В.С., Ярных Л.В., Афонаскин А.В. Новое поколение дуговых печей постоянного тока для металлургического и литейного производства // Труды VII конгресса сталеплавильщиков. М.: Чеметинформация, 2003. С. 70–77.
- 52.Адати Т., Селлан Р. Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Токуо

- Steel, Япония // *Металлургическое производство и технология*. 2012. № 2. С. 8–17.
53. Пат. 2040864 РФ, МПК⁶ H05B7/20, H05B7/02, H05B7/11 Плавильная электрическая печь постоянного тока / Р.А. Жаньяк, Н. Мейсон. Опубл. 25.07.1995.
54. Пат. 2097947 РФ, МПК⁶ H05B7/20, H05B7/11, F27D11/10, F27B3/08 Электродуговая печь постоянного тока и способ ее работы / Э. Никс. Опубл. 27.11.1997.
55. Пат. 2070777 РФ, МПК⁶ H05B7/20, H05B7/06, H05B7/11, F27B3/08, F27B3/14, F27B3/16 Дуговая печь постоянного тока / Э. Никс. Опубл. 20.12.1996.
56. Пат. 2107236 РФ, МПК⁷ F27B3/08, C21C5/52 Подовый электрод металлургической емкости постоянного тока / Х. Штарк, Х. Кениг. Опубл. 20.03.1998.
57. Применение МГД устройств в металлургии / Под ред. В.Н. Тимофеева, Е.А. Головенко, Е.В. Кузнецова. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. 298 с.
58. Нехамин И.С., Рубцов В.П. Исследование системы регулирования тока дуговой сталеплавильной печи постоянного тока // *Вестник МЭИ*. 2007. №5. С. 34–40.
59. Макаров А.Н., Шимко М.Б., Зуйков Р.М. Теплообмен в одно- и четырехэлектродных дуговых сталеплавильных печах постоянного и переменного тока // *Электрометаллургия*, 2004. № 3. С. 12–15.
60. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
61. Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил. Рига: Зинатне, 1975. 248 с.
62. Мешков М.А. Исследование процесса плавки алюминиевых сплавов дугой постоянного тока / *Технология легких сплавов*, 2002. №2. С.20--26
63. К вопросу о формировании электровихревых течений при многоэлектродном токоподводе / С.Б. Дементьев, В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин и др. // *Магнитная гидродинамика*. 1988. № 4. С. 121–125.
64. Исследование деформации свободной поверхности и ее влияния на интенсивность электро-вихревого течения жидкого металла / Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А. и др. // *Тепловые процессы в технике*. 2012. №11. С. 487–495.
65. Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения / Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Гусева А.А., Токарев Ю.Н. // *Тепловые процессы в технике*. 2012. №8. С. 345 – 352.
66. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., Протоковиллов И.В. Физическое моделирование

- электровихревых течений при ЭШП // Современная электрометаллургия». 2013 № 1. С. 3–7.
67. Экспериментальное исследование поля скоростей в осесимметричном электровихревом течении в цилиндрическом контейнере / Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А. и др. // Магнитная гидродинамика. 1986. № 3. С. 110–116.
68. Ивочкин Ю.П., Виноградов Д.А., Тепляков И.О. Численный расчет магнитного поля с использованием технологии CUDA применительно к моделированию электровихревых течений // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2015. № 2. С. 13–18.
69. Ячиков И.М. Нестационарное электровихревое течение в ванне расплава при включении и отключении тока дуги // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009, №2. С. 79–83.
70. Ячиков И.М., Логунова О.С. Управление объемными электромагнитными силами в ванне дуговой печи постоянного тока // Автоматизация в промышленности. 2010. № 7. С. 20–23.
71. Козак О.В., Семко А.Н. Моделирование электровихревых течений в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока с подовым электродом // Вісник Хмельницького національного університету. 2011. № 4. С. 32–39.
72. Казак О.В., Семко А.Н. Электровихревые течения в дуговых печах постоянного тока. Донецк: Ноулидж, 2013. 134 с.
73. А.с. 51049690 СССР, МКИ² F15G 11/00. Электромагнитный желоб. Опубл. 23.10.83. Бюл. № 39.
74. Круминь Электромагнитные лотки. Рига: Зинатне, 1973. 56 с.
75. Ефименко С.П., Пилюшенко В.Л., Смирнов А.Н. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. М.: Металлургия, 1989. 168 с.
76. Производство стали на агрегате печь-ковш / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2003. 300 с.
77. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали. М.: Металлургия. 1964. 207 с.
78. Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья. М.: Металлургия, 1970. 224 с.
79. ГОСТ 2176-77 Отливки из высоколегированной стали со специальными свойствами. Общие технические условия.
80. ГОСТ 21357-87 Отливки из хладостойкой и износостойкой стали. Общие техни-

ческие условия.

- 81.ГОСТ 977-88 Отливки стальные. Общие технические условия.
- 82.Пат. 2348025 РФ, МКИ⁷ С21С 5/52. Способ выплавки высокомарганцевой стали / И.Д. Андреев, А.В. Афонаскин, А.И. Давыдов и др. Опубл. 27.02.2006. Бюл. № 6.
- 83.Особенности материального и теплового балансов ДСП-180 ОАО «ММК» / В.А. Бигеев, А.Е. Малофеев, А.В. Пантелеев и др. // Электрометаллургия. 2008. №12. С. 16-18.
- 84.Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов. М.: Metallurgy, 1982. 158 с.
- 85.Егоров А.В. Современная дуговая сталеплавильная печь// Труды III Международной научно-практической конференции «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее». М. МИСиС, 2006. С. 279-286.
86. Физико-химическая оценка свойств промышленных ферросплавов / В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков и др. // Сб. научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Днепропетровск. 2007. Вып. 14. С.235–243.
- 87.ГОСТ 4755-91 Ферромарганец. Технические требования и условия поставки.
- 88.Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. М.: Metallurgy, 1987. 224 с.
- 89.Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М: Атомиздат, 1979. 416 с.
- 90.Пат. на ПМ 119556 РФ, МКИ⁷ Н05В 7/20 / Портнова И.В., Ячиков И.М., Харченко О.А. Опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23.
- 91.Пат. на ПМ 126810 РФ, МКИ⁷ Н05В 7/20 / Ячиков И.М., Портнова И.В., Заляутдинов Р.Ю. Опубл. 10.04.2013 Бюл. № 10.
- 92.Ячиков И.М., Портнова И.В, Заляутдинов Р.Ю. Моделирование поведения магнитного поля в ванне ДППТ при разных конструкциях токоподвода к подовому электроду // Математическое и программное обеспечение в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. 2012. С. 183-190.
- 93.Ячиков И.М., Заляутдинов Р.Ю. Исследование магнитного поля в ванне дуговой печи постоянного тока при разной форме токоподводящей шины к подовому электроду // Изв. вузов. Черная металлургия, № 3. 2014. С. 58–63.
- 94.Портнова И.В., Ячиков И.М., Яковлев А.Д. Расчет магнитного поля вблизи токо-

- подводов различной конфигурации: Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014661999. ОБПТБ. 2014. № 12. С. 589.
95. Ячиков И.М., Портнова И.В. Поведение магнитного поля в ванне ДППТ при разной конструкции токоподводящей шины к подовому электроду // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1. С. 76–81.
96. Ячиков И.М., Портнова И.В. Оценка эффективности электровихревого и кондукционного воздействия на расплав в ванне ДППТ // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сб. докл. межд. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 418–423.
97. Ячиков И.М., Портнова И.В. Совершенствование технологии электровихревого и кондукционного перемешивания металла в ванне дуговой печи постоянного тока // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XIII Международ. конф. Челябинск. Ч.1: Изд-во ЮУрГУ, 2015. С. 126–130.
98. Yachikov I.M., Portnova I.V. Modeling of magnetic field behavior in dc arc furnace bath for different designs of current lead of bottom electrode // Sciences of the Europe. VOL 2, No 2 (2) (2016). pp. 67–72.
99. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ, Сообщение 3 / И.М. Ячиков, Ю.Н. Смолин, В.Н. Манагаров, И.В. Портнова // Изв вузов. Черная металлургия, № 3. 2008. С. 29–33.
100. Ячиков И.М., Портнова И.В. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ // Изв. вузов. Черная металлургия, № 7. 2005. С. 27–29.
101. Ячиков И.М., Портнова И.В. Электромагнитные процессы в ванне ДППТ при произвольном расположении подового электрода // Электрометаллургия. 2006. № 11. С. 35–39.
102. Yachikov I.M., Portnova I.V. Electromagnetic processes in a DC arc-furnace bath with an arbitrarily located bottom electrode // Russian metallurgy (Metally). 2007. № 7. С. 571–575. DOI: 10/1134/S0036029507070063.
103. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи: Свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012661209. ОБПТБ. 2012. № 5. С. 589.
104. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Электровихревые течения ме-

- талла ванне ДППТ // Творческое наследие Б.И. Китаева: тр. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 309–313.
105. Ячиков И.М., Манагаров В.Н. Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ // Вестник Самарского государственного университета. 2008, №6. С. 330–340.
106. Ячиков И.М., Манагаров В.Н. Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ // Вестник ИжГТУ. 2008, № 4. С. 186 – 191.
107. Ячиков И.М., Манагаров В.Н. Моделирование электромагнитных процессов в ванне расплава дуговой печи постоянного тока // Программные продукты и системы. 2008. № 3. С. 81–83.
108. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М., Metallurgia, 1981. 320 с.
109. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Моделирование электромагнитных процессов, протекающих в ванне расплава ДППТ. Сообщение 2. Электрические характеристики ванны дуговой печи постоянного тока с двумя подовыми электродами // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 11. С.23–26.
110. Ячиков И.М., Манагаров В.Н., Портнова И.В. Моделирование электромагнитных сил в ванне дуговой печи постоянного тока с двумя подовыми электродами // Математика. Приложение математики в экономических, технических и педагогических исследованиях: сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2006. Вып. 4. С. 219–227.
111. Моделирование электровихревых течений в ванне дуговой печи постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 234 с.
112. Ячиков И.М., Колокольцев В.М., Портнова И.В. Электромагнитные силы в ванне дуговой печи постоянного тока // Черная металлургия: бюллетень НТИЭИ. 2007. №. 8. С. 25–28.
113. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Характер поведения объемных электромагнитных сил в ванне ДППТ при изменении токов через подовые аноды // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 14. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 215–219.
114. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Влияние положения подового анода на электромагнитное поле в ванне ДППТ // Теория и технология металлур-

- гического производства: Межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: МГТУ. 2005. Вып. 5. С. 222—227.
115. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Характер электровихревых течений в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. Вып. 8. С. 164–169.
116. Ячиков И.М., Портнова И.В., Манагаров В.Н. Моделирование электрических параметров в ванне дуговой печи постоянного тока с двумя подовыми электродами // Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества: Труды Международ. науч.-практ. конф. Новокузнецк: СГИУ. 2006. Т.1. С. 118–122.
117. Ячиков И.М., Портнова И.В. Влияние диаметра подовых электродов и протекающих через них токов на объемные электромагнитные силы в ванне ДППТ // Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях РФ: Сб. науч. трудов Всероссийск. науч.-техн. конф. Вып. 2. Магнитогорск: ИПЦ ООО «Проф-Принт», 2007. С.273–278.
118. Дементьев С.Б., Чайковский А.И., Чудновский А.Ю. Формирование электровихревых течений в ваннах с многоэлектродным токоподводом // Магнитная гидродинамика. 1988, № 1. С. 85–89.
119. Чудновский А.Ю. О моделировании электровихревых течений // Магнитная гидродинамика. 1989. № 3. С. 69–74.
120. Кубланов В.Я. Движение металла в ванне и на торце плавящегося электрода при плазменно-дуговом переплаве: Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ИМЕТ АН СССР, 1974. 23 с.
121. Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса / Леманов В.В., Терехов В.И., Шаров К.А., Шумейко А.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 9. С. 34-40.
122. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974. 496 с.
123. Власюк В.Х.. Турбулентные электровихревые течения в цилиндрической емкости // Магнитная гидродинамика. 1988. № 3. С. 76–82.
124. Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О. К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений // Теплофизика высоких температур Т.47. 2011. №6. С.957.

125. Ивочкин Ю.П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами: дисс... д-ра техн. наук. М. 2015. 407 с.
126. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. М.: Металлургия, 1984. 119 с.
127. Гречко А.В., Нестеренко В.Д., Кудинов Ю.А. Практика физического моделирования на металлургическом заводе. М.: Металлургия, 1976. 224 с.
128. Ячиков И.М., Портнова И.В. Характер течения металла в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 3. С. 67–69.
129. Ячиков И.М., Портнова И.В., Харченко О.А. Характер электровихревого течения металла в ванне ДППТ при изменении положения катода // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 3. С. 18–20.
130. Ячиков И.М., Портнова И.В. Характер электровихревого течения металла в ванне дуговой печи постоянного тока // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 6–3. С. 422–426.
131. Белов В.К. Метрологическая обработка результатов физического эксперимента: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. Магнитогорск: МГТУ, 2004. 121 с.
132. Миллере Р.П., Шарамкин В.И., Щербинин Э.В. Действие продольного магнитного поля на электровихревое течение в цилиндрической ванне // Магнитная гидродинамика. 1980. № 1. С. 81–85.
133. Пат. на ПМ 52990 РФ, МКИ⁷ С22В 9/00, F27В 3/08 Дуговая печь постоянного тока / И.М. Ячиков, А.П. Морозов, И.В. Портнова. Опубл. 27.04.2006.
134. Пат. 2293268 РФ, МПК⁷ F27В 3/08, С22В 9/22 Способ электроплавки в дуговой печи постоянного тока / И.М. Ячиков, А.П. Морозов, И.В. Портнова. Опубл. 10.02.2007.
135. Маслов Д.В. Разработка алгоритмов и систем управления дуговыми сталеплавильными печами, снижающими поломки электродов: дис. канд. техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2014. 141 с.
136. Портнова И.В., Ячиков И.М. Моделирование процесса растворения ферромарганца при принудительном перемешивании жидкой ванны // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 1. С. 34–38.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А



1/171

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2014661999

Расчет магнитного поля вблизи токопроводов различной конфигурации

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU)*

Авторы: *Портнова Ирина Васильевна (RU), Ячиков Игорь Михайлович (RU), Яковлев Александр Дмитриевич (RU)*

Заявка № **2014619984**
Дата поступления **06 октября 2014 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **19 ноября 2014 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Л.Л. Кирий Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2012661209

Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи

Правообладатель(и): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (RU)*

Автор(ы): *Ячиков Игорь Михайлович,
Портнова Ирина Васильевна,
Манагаров Владимир Николаевич (RU)*

Заявка № **2012619215**
Дата поступления **26 октября 2012 г.**
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
11 декабря 2012 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Б.П. Симонов Б.П. Симонов

Описание возможностей программы

«Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи»

Алгоритм работы программы показан на рисунке В.1.

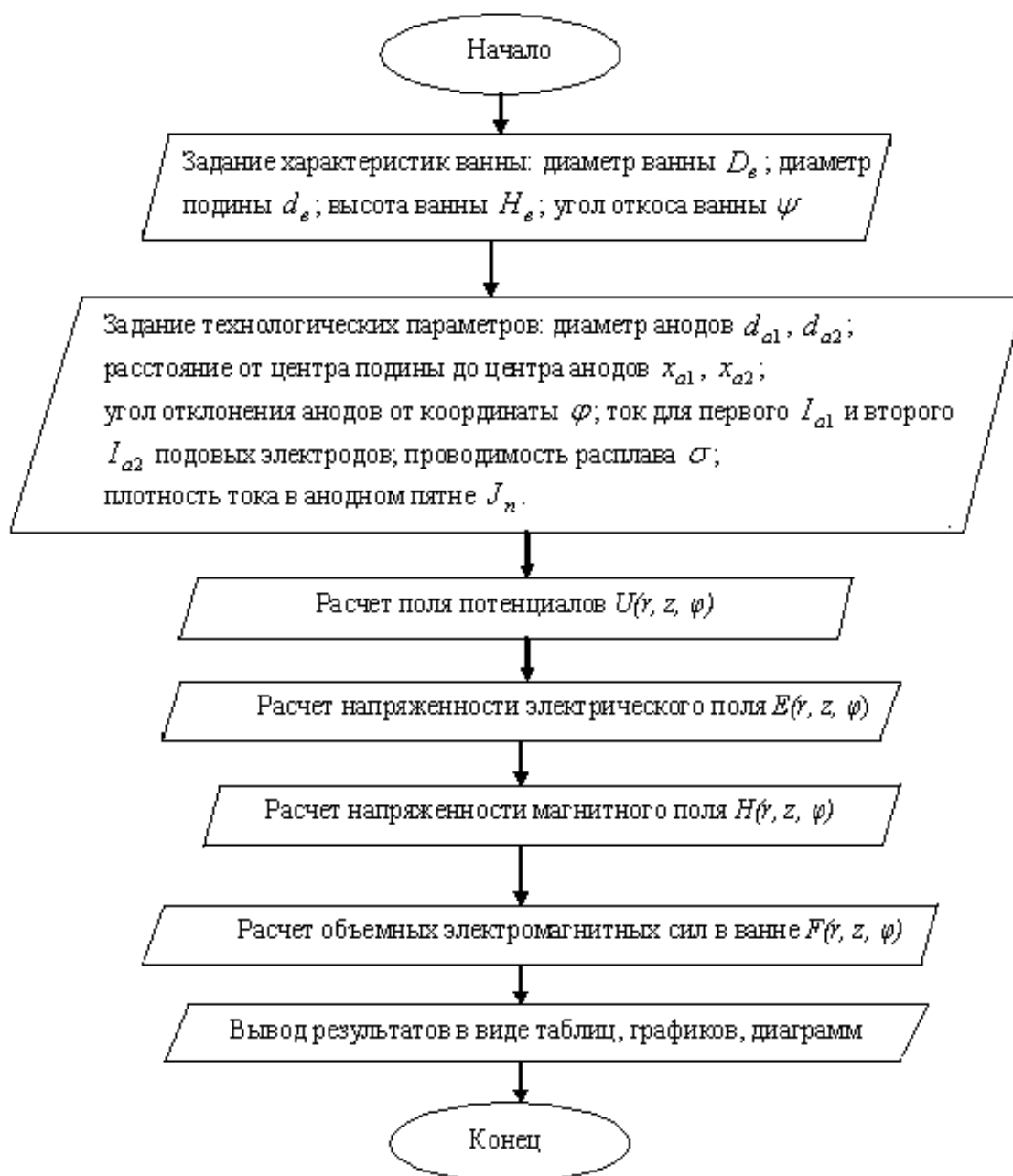


Рисунок В.1 – Алгоритм расчета по программе «Электромагнитные процессы в ванне дуговой печи»

После запуска программы загружается главная форма (рисунок В.2), которая позволяет создать новый файл для расчета или открыть уже существующий файл, с ранее проведенными расчетами, получить справку о работе с программой.



Рисунок В.2 – Главное окно программы

При создании нового файла открывается окно «Форма ванны», где задаются основные геометрические характеристики: диаметры ванны и подины, высота ванны; выбирается количество подовых электродов (один или два), их диаметр, расстояние от центра подины до центра подового электрода, угол расположения подовых электродов (рисунок В.3). Для наглядности и избежание ошибок при задании геометрических параметров ванны и электродов при вводе данных происходит автоматическая прорисовка схемы ванны (виды сбоку и сверху) с указанием размеров и соблюдением пропорций. Пользователь определяет количество подовых электродов, и задает величину токов I_{a1} , I_{a2} , протекающих через них; проводимость расплава σ ; плотность тока в пятне дуги J_n . Затем выбираются параметры сетки. Для пятна дуги предусмотрена возможность задать его местоположение на поверхности ванны и диаметр.

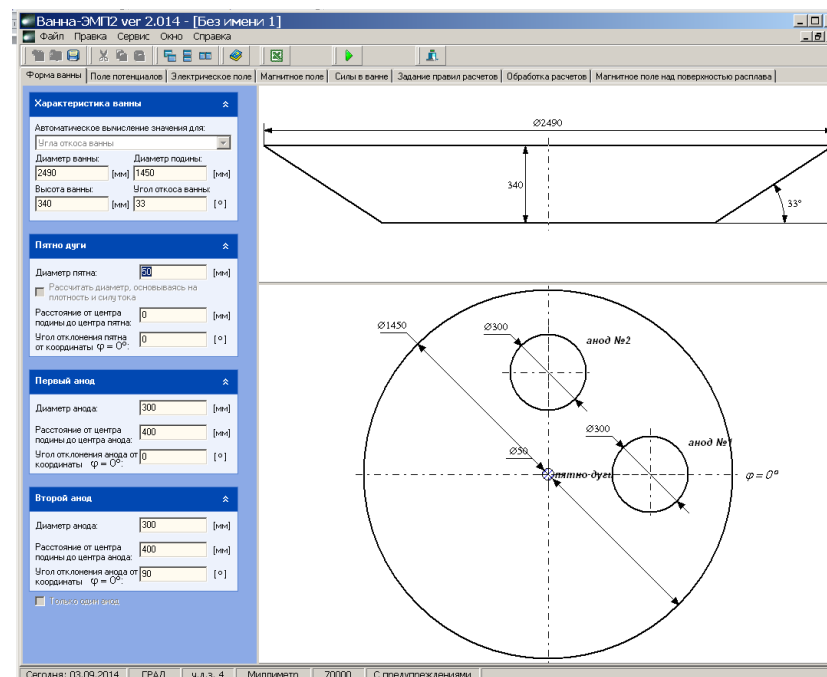
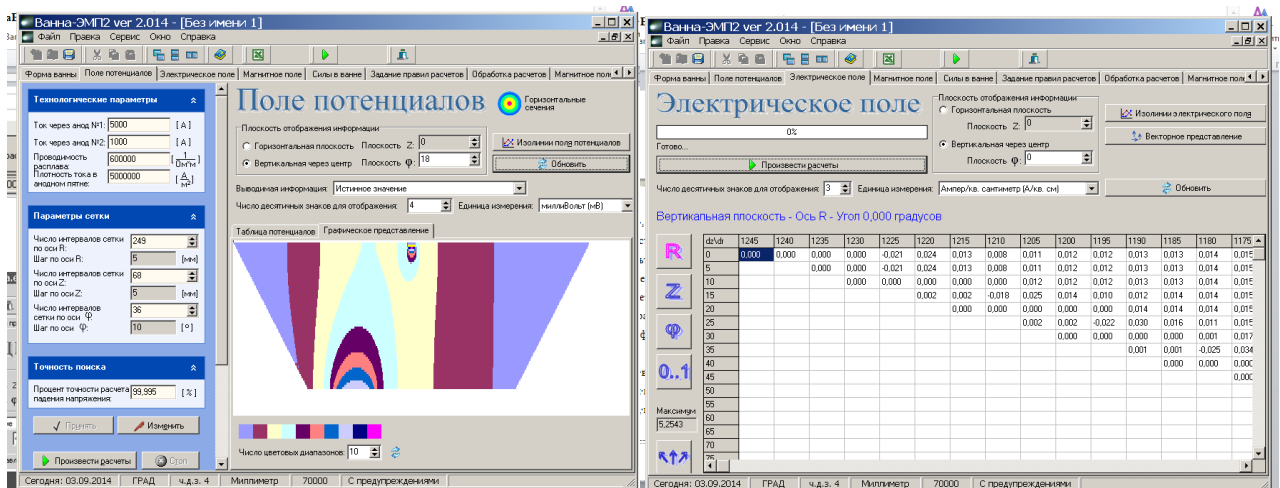


Рисунок В.3 – Окно «Форма ванны»

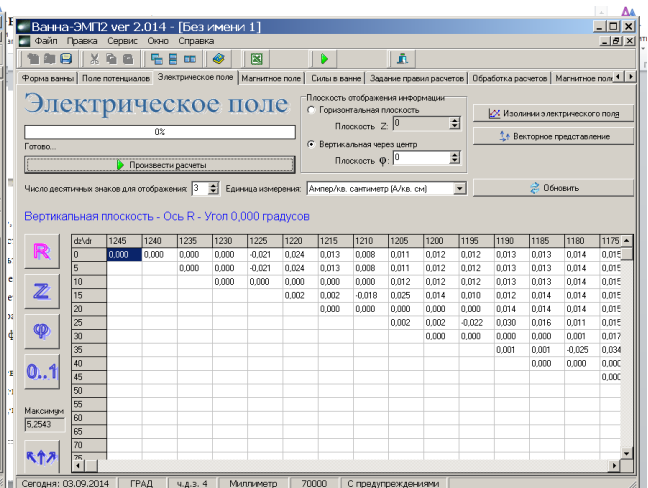
Вся вводимая информация проверяется на корректность и допустимость. При обнаружении ошибки выдается предупреждающее сообщение, и дальнейшая работа программы приостанавливается до ее исправления. После заполнения всей информации и нажатия кнопки «Принять», ввод данных блокируется и начинается расчет. Работу программы можно остановить кнопкой «Стоп» на любом этапе и сохранить полученные результаты. Во время расчета происходит информирование пользователя о проценте проведения текущего этапа и оценочное время, оставшееся до конца расчета. Результаты компьютерного моделирования электромагнитных параметров могут быть выведены в векторной и табличной формах, в виде графиков и диаграмм. Результаты расчета поля электрических потенциалов могут быть представлены в табличном и графическом видах для любой вертикальной и горизонтальной плоскостей. Для этого необходимо задать номер плоскости, который определяется числом интервалов, накладываемой сетки (рисунок В.4, а).

Окно «Электрическое поле» предназначено для проведения расчетов по определению распределения составляющих напряженности электрического поля по области ванны. Полученные результаты могут быть представлены в табличном и графическом видах. Для просмотра полученных результатов радиальной, осевой и азимутальной составляющих напряженности электрического поля вдоль осей r , z , φ пользователю необходимо нажать одноименную кнопку. Существует возможность отображения результатов в безразмерном виде для этого необходимо воспользоваться кнопкой «0...1» (рисунок В.4, б).

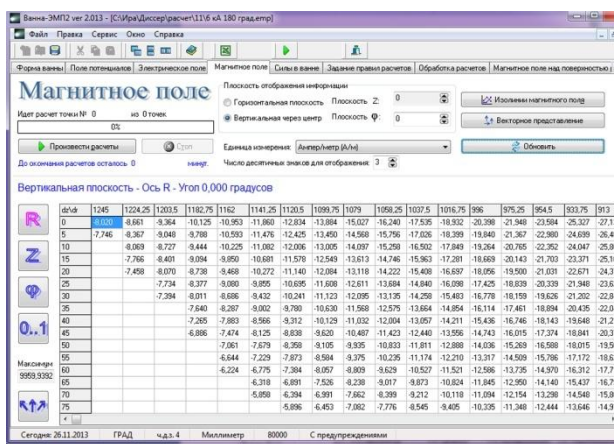
Для проведения расчетов напряженности магнитного поля и последующей обработки полученных результатов предусмотрено окно «Магнитное поле». Во время расчета происходит информирование пользователя о проценте проведения текущего этапа и оценочное время, оставшееся до конца расчета. Расчет можно остановить кнопкой «Стоп». Полученные данные также можно посмотреть как в табличном, так и векторном или графическом видах (рисунок В.4, в).



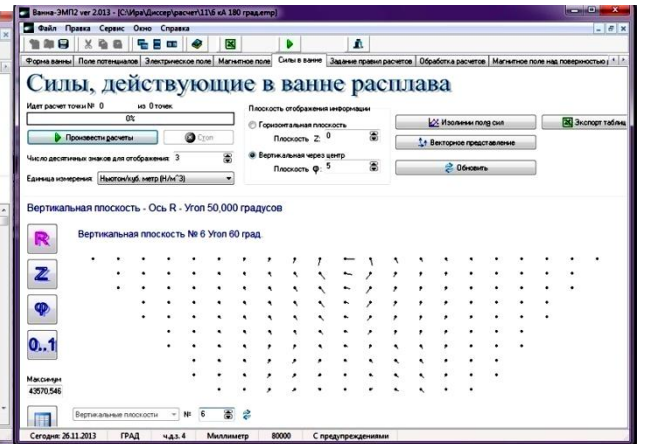
а



б



в



г

Рисунок В.4 – Представление результатов расчета: а – поля потенциалов; б – электрического поля; в – магнитного поля; г – поля ОЭМС

Для проведения расчетов по определению объемных электромагнитных сил, действующих в ванне расплава, следует перейти в окно «Силы в ванне» (рисунок В.4, г). Способ отображения расчетов и визуализации расчетов аналогичен применяемому в разделах «Электрическое поле» и «Магнитное поле».

После окончания расчетов в этой вкладке появляется надпись «Расчеты выполнены успешно!». Для более детального анализа полученные результаты можно экспортировать в MS Excel при нажатии кнопки «Экспорт таблиц в Excel».

Описание возможностей программы «Расчет магнитного поля вблизи токопроводов различной конфигурации»

После запуска программы происходит загрузка ее главного окна, которое включает в себя следующие вкладки: «Круговой виток»; «Спиральный виток»; «Винтовая линия»; «Спираль Архимеда»; «Количество графиков»; «Значение магнитного поля в одной точке» (рисунок Г.1).

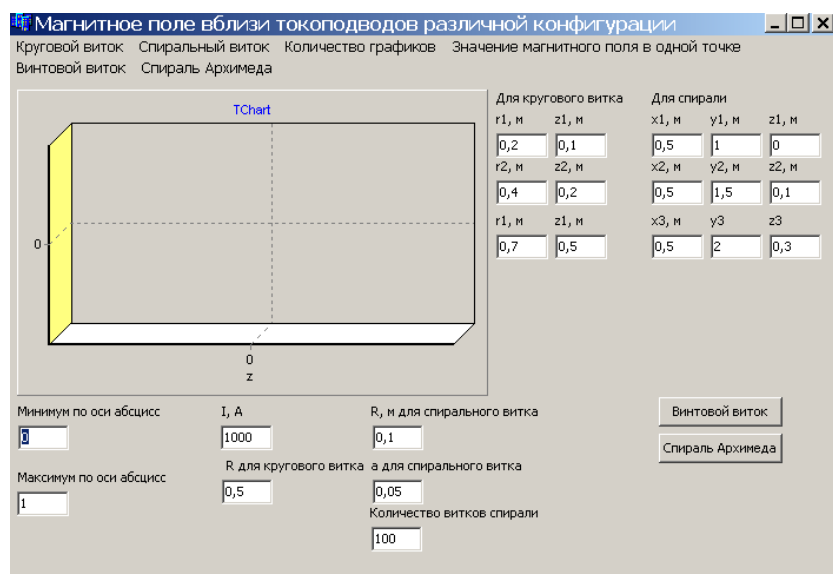


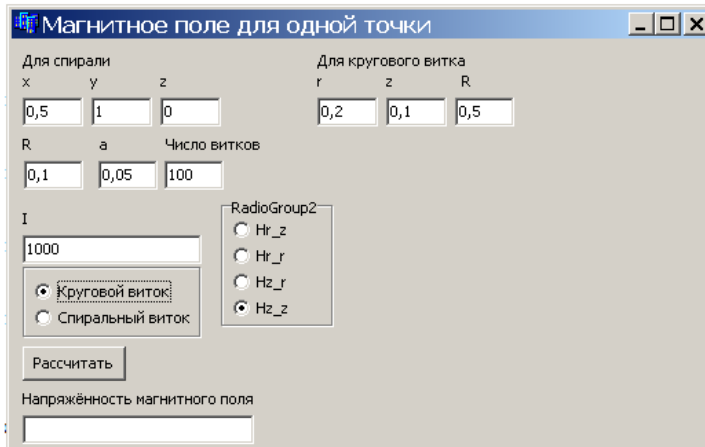
Рисунок Г.1 – Главное меню

Программа позволяет рассчитать величину магнитного поля как на расстоянии от токопровода, так и в конкретной точке. Для первого случая пользователь задает в окошках главного меню координаты (r и z для кругового витка и x , y , z для спирального) в окошках главного меню (см. рисунок Г.1). Для второго – переходит на вкладку «Магнитное поле в одной точке» (рисунок Г.2, а). После этого необходимо установить требуемые параметры токопровода: радиус витка R , расстояние между витками a , и количество витков n ; силу тока I .

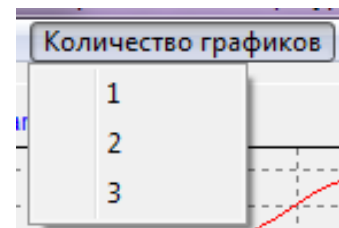
Затем пользователь должен выбрать вид токопровода на одноименных вкладках и требующийся ему тип графика. Пользователь может построить до трёх графиков одновременно. Число графиков можно регулировать через пункт «количество графиков» в главном меню и запустить его построение щелчком мыши (рисунок Г.2, б).

Пользователь может выбрать тип графиков изменения проекции напряжённости

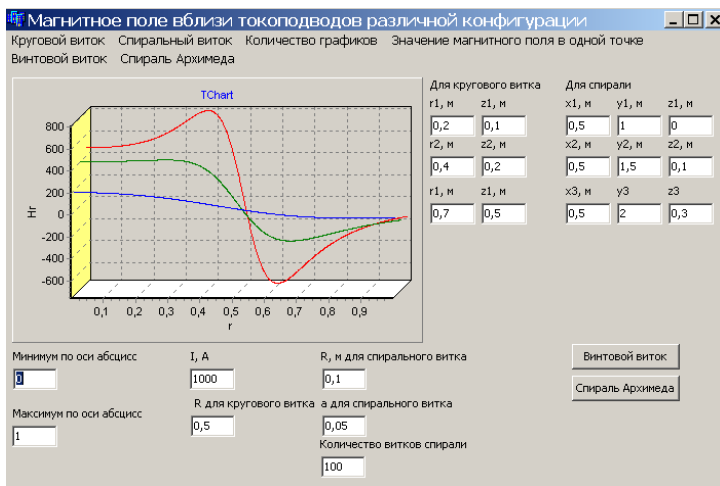
магнитного поля на оси или в точке около кругового витка в зависимости от z или r для кругового витка, а также тип графиков изменения напряжённости магнитного поля в точке около спирального витка в зависимости от координаты или r (рисунок Г.2, д). После чего графики выводятся на экран в окне главного меню (рисунок Г.2, в).



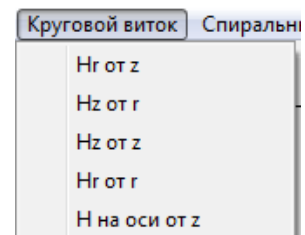
а



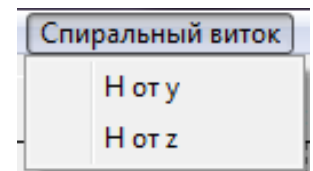
б



в



г



д

Рисунок Г.2 – Окна программы: а – «Магнитное поле для одной точки»; б – «Количество графиков»; в – Изменение проекции напряжённости магнитного поля на ось z в зависимости от r для кругового витка; г – «Круговой виток»; д – «Спиральный виток»

Приложение Д

Таблица Д.1 – Основные теплофизические свойства жидких металлов оригинала и модели

Параметр	Сталь	Олово
Кинематическая вязкость ν , м/с ²	$6,85 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$
Температура плавления, °С	1530	231,9
Удельная теплота плавления, кДж/кг	84	59
Плотность расплава при температуре плавления γ , кг/м ³	7000–7200	7300

Таблица Д2 – Теплофизические свойства жидких материалов оригинала и модели

Параметр	Обозначение	Жидкая сталь (0,3% С)	Раствор соли в воде при 20° С
Магнитная постоянная, Н/А ²	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} = 1,2566 \cdot 10^{-6}$	
Сила тока через жидкость, А	I	6000	2,8
Кинематическая вязкость жидкости, м ² /с	ν	$6,85 \cdot 10^{-7}$	$10,0 \cdot 10^{-7}$
Плотность жидкости, кг/м ³	ρ	7000	1189
Параметр вихревого течения	S	$1,377 \cdot 10^{10}$	3674



Общество с ограниченной ответственностью
«Энергомонтаж»

Адрес : 107143, г.Москва, 2-й Иртышский пр-д, д.4Б, стр.5, тел/факс (495) 780-3847
р/счет 40702810300700140915 в Волоколамском филиале Банка «Возрождение» (ОАО)
к/сч. 30101810900000000181, БИК 044525181,
ИНН 5004021032, КПП 500401001, ОГРН 1085004000322, ОКПО 84355783

Справка
о внедрении материалов диссертационной работы
Портновой Ирины Васильевны

При разработке технического задания для автоматизированных систем управления током в дуговых печах постоянного тока были использованы теоретические и практические разработки, предложенные Портновой И.В. в диссертационной работе.

1. Методические разработки, расчетные методы и математические модели, позволяющие определять геометрические параметры токоподводов к подовому электроду дуговой печи постоянного тока, и рекомендации по выбору конструкции токоподвода.

2. Компьютерная программа «Расчет магнитного поля вблизи токоподводов различной конфигурации», свидетельство РФ о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014661999.

Главный инженер, к.т.н.

/ Паргунькин К.Е





Общество с ограниченной ответственностью
«Энергомонтаж»

Адрес : 107143, г.Москва, 2-й Иртышский пр-д, д.4Б, стр.5, тел/факс (495) 780-3847
р/счет 40702810300700140915 в Волоколамском филиале Банка «Возрождение» (ОАО)
к/сч. 30101810900000000181, БИК 044525181,
ИНН 5004021032, КПП 500401001, ОГРН 1085004000322, ОКПО 84355783

Заключение
об использовании результатов научных исследований
по патенту на полезную модель № 126810
«Электродуговая печь постоянного тока»,
авторов Ячикова И.М., Портновой И.В., Заляутдинова Р.Ю.

Авторами предложено техническое решение, предусматривающее подведение в дуговой печи постоянного тока токоподвод к подовому электроду в виде пространственной винтовой линии, имеющей по меньшей мере один виток с возможностью перемещения ферромагнитного сердечника в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Внедрение данного патента позволило подготовить конструкторскую документацию на ДППТ-6 с новыми предложенными технологическими решениям.

Главный инженер, к.т.н.

/ Паргунькин К.Е

