

На правах рукописи

Виноградов Дмитрий Андреевич

**Электровихревое течение жидкого металла
в полусферическом контейнере при воздействии
внешнего магнитного поля**

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель:	Тепляков Игорь Олегович , кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.
Официальные оппоненты:	Соколов Дмитрий Дмитриевич , доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова». Ячиков Игорь Михайлович , доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится «14» октября 2026 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур, по адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан “____” августа 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
кандидат физико-математических наук

А.В.Тимофеев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение требований к качеству электрометаллургической продукции обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования и модернизации промышленных агрегатов. Важным направлением такой модернизации является управление электровихревыми течениями (ЭВТ), формируемися в расплаве жидкого металла плавильных установок [1]. Электровихревые течения существенно изменяют гидродинамическую структуру потока и тем самым напрямую влияют на скорость плавки, интенсивность и однородность перемешивания расплава. Поскольку указанные факторы в значительной степени определяют качество готового продукта, исследование ЭВТ представляет собой важную и актуальную задачу.

Модель растекания тока в цилиндрическом или полусферическом объеме с локальным подводом тока [2–4] воспроизводит ключевую особенность ряда электрометаллургических процессов - резко неоднородное распределение плотности тока и электромагнитной силы вблизи малого электрода, приводящее к возникновению электровихревых течений. При этом структура ЭВТ изменяется вследствие воздействия магнитных полей (МП) различной интенсивности и конфигурации. Рассматриваемая постановка соответствует условиям ряда промышленных процессов - от электрошлаковой сварки [5; 6] до электродугового [7; 8] и электрошлакового переплава [9; 10] и потому является удобной моделью для систематического исследования влияния электрического тока и магнитного поля на характеристики ЭВТ.

Внешнее магнитное поле является эффективным средством управления структурой ЭВТ, вызывая существенную перестройку течения [11–13]. При этом в зависимости от величины поля возможны как интенсификация, так и подавление ЭВТ. Поэтому целесообразно провести детальное исследование структуры и характеристик электровихревых течений под воздействием внешнего магнитного поля, так как полученные данные могут быть использованы с целью модернизации промышленных металлургических установок для повышения их эффективности.

Степень разработанности темы исследования. Исследования ЭВТ велись в ряде ведущих научно-исследовательских институтов по всему миру: ОИВТ РАН (Москва, Россия), University of Sheffield (Шеффилд, Великобритания), University of Cambridge (Кембридж, Великобритания), University of Latvia (Рига, Латвия), ИМСС УрО РАН (Пермь, Россия), МГТУ им. Г.И. Носова (Магнитогорск, Россия), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Дрезден, Германия), Universite Paris-Saclay (Орсэ, Франция) и др.

На момент начала выполнения диссертационной работы для рассматриваемой постановки задачи были известны следующие особенности и закономерности ЭВТ:

1. ЭВТ при отсутствии внешних МП представляет собой осесимметричный тороидаальный вихрь, направленный вниз в области под малым электродом или дугой.
2. Течение вблизи малого электрода представляет собой затопленную струю.

3. Внешнее магнитное поле приводит к уменьшению придонного давления в области под малым электродом, а при достаточно сильном внешнем магнитном поле формируется область пониженного давления.

4. Внешнее продольное магнитное поле приводит к возникновению азимутальной закрутки жидкого металла и образованию вторичных вихрей, которые противонаправлены основному течению.

5. Магнитное поле Земли так же, как и МП искусственного происхождения, приводит к азимутальной закрутке течения.

6. При достаточно большом внешнем МП основной тороидальный вихрь полностью подавляется вторичным противонаправленным течением.

7. При численном моделировании ЭВТ при отсутствии внешнего магнитного поля электродинамическое приближение (ЭД) справедливо для $S < 10^{12}$ ($I \sim 30$ кА).

Более подробный обзор исследований, посвященных ЭВТ, представлен в первой главе диссертации.

Цели и задачи работы. В данной диссертационной работе требовалось исследовать особенности ЭВТ в полусферическом контейнере в широком диапазоне внешних МП и тем самым расширить информацию о гидродинамической структуре ЭВТ при наличии внешнего МП. Таким образом, для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Выполнить экспериментальные исследования ЭВТ при наличии магнитного поля Земли и при его компенсации.

2. Провести исследования вихреобразования в ЭВТ при внешних осевых МП средней величины ($B_z = 10^{-4} - 10^{-3}$ Тл).

3. Исследовать границы применения различных магнитогидродинамических (МГД) приближений при численном моделировании ЭВТ при влиянии внешнего МП ($B_z = 10^{-3} - 1$ Тл).

4. Провести дополнительные исследования интегральных характеристик ЭВТ (характерные скорости, кинетическая энергия течения) при внешних магнитных полях средней величины ($B_z = 10^{-4} - 10^{-3}$ Тл), а также исследовать ЭВТ при сильных внешних магнитных полях ($B_z = 10^{-3} - 1$ Тл) с учетом установленной области применимости МГД приближений.

Научная новизна. В данной диссертационной работе с использованием комплекса экспериментальных и численных методов получены новые данные о структуре электровихревого течения в полусферическом контейнере в широком диапазоне значений внешнего осевого магнитного поля. В ранее опубликованных работах других авторов влияние внешнего магнитного поля исследовалось преимущественно для отдельных режимов течения или в ограниченном диапазоне его значений.

Таким образом, впервые:

1. Экспериментально установлено, что магнитное поле Земли приводит к снижению осевой скорости в области струи электровихревого течения эвтектического сплава In-Ga-Sn по сравнению с режимом компенсации геомагнитного поля ($I = 100 - 450$ А, $S = 10^7 - 2 \times 10^8$, $N = 1.6 \times 10^4 - 1.8 \times 10^6$).

2. Установлены закономерности автоколебаний жидкого металла в электровихревом течении в зависимости от величины внешнего магнитного поля ($I = 400$ А, $B_z = 10^{-4} - 10^{-3}$ Тл, $S = 1.7 \times 10^8$, $N = 3.2 \times 10^6 - 3.2 \times 10^7$).

3. Экспериментально и численно получены данные о времени образования восходящего тороидального вихря в зависимости от величины внешнего МП ($I = 400$ А, $B_z = 10^{-4}$ – 10^{-3} Тл, $S = 1.7 \times 10^8$, $N = 3.2 \times 10^6$ – 3.2×10^7).

4. Численным методом получена граница раздела зон одновихревого и двухвихревого течения в координатах $B_z(I)$ ($I = 1$ – 1000 А, $B_z = 10^{-5}$ – 1.4×10^{-4} Тл, $S = 10^3$ – 10^9 , $N = 788$ – 1.1×10^7).

5. Исследована применимость различных МГД приближений в ЭВТ при воздействии внешнего МП ($B_z = 10^{-3}$ – 1 Тл, $S = 10^5$ – 3.2×10^{11} , $N = 7.8 \times 10^5$ – 2×10^{11} , $St = 4.8 \times 10^{-3}$ – 4×10^4).

6. Выявлен эффект электромагнитного торможения ЭВТ под действием индуцированных электрических токов при воздействии сильного внешнего поля ($B_z \geq 10^{-2}$ Тл, $S = 10^7$, $N \geq 7.8 \times 10^7$, $St \geq 0.067$).

7. Получена структура течения в диапазоне внешнего МП от 5×10^{-5} до 1 Тл ($I = 100$ – 1000 А, $S = 10^7$ – 10^9 , $N = 4 \times 10^5$ – 7.8×10^{10} , $St = 4 \times 10^{-5}$ – 5×10^4).

Теоретическая и практическая значимость. В диссертационной работе продемонстрирована возможность измерения корреляционным методом скорости потока жидкого металла при наличии электрического тока. Таким образом, корреляционный метод может быть использован для измерения скорости в высокотемпературных промышленных агрегатах, а главным ограничением остается температурная стойкость применяемых термопар.

При численном моделировании электровихревых течений в присутствии внешнего магнитного поля электродинамическое приближение корректно описывает течение до некоторой пороговой величины внешнего МП, при превышении которой следует использовать безындукционное приближение (БИ) или решать полную МГД задачу. Для сплава In-Ga-Sn электродинамическое приближение справедливо для внешнего МП $B_z < 1.25 \times 10^{-3}$ Тл.

В диссертации показано, что в диапазоне режимных параметров электрического тока $I = 100$ – 1000 А и внешнего МП от 5×10^{-5} до 1 Тл ($S = 10^7$ – 10^9 , $N = 4 \times 10^5$ – 7.8×10^{10} , $St = 4 \times 10^{-5}$ – 5×10^4), имеются два минимума интенсивности течения (при $B_z \sim 10^{-4}$ и 1 Тл). Первый минимум связан с азимутальной закруткой течения и возникновением возвратного течения, а второй минимум – с электромагнитным торможением, вызванным электрическими токами, индуцированными движением электропроводящей среды. Таким образом, эти особенности следует учитывать при проектировании промышленных агрегатов, где внешнее МП используется как метод управления структурой ЭВТ.

Внешние магнитные поля уже используются в ряде промышленных установок. Например, в промышленных вакуумно-дуговых печах ДКВ-3,2 и ДТВ-3.0Г0.5, где для предотвращения переброса дуги на стенку кристаллизатора используется соленоид, намотанный на внешнюю стенку кристаллизатора. Соленоид создает магнитное поле (0 – 7×10^{-3} Тл), которое сжимает электрическую дугу. Применение соленоида также приводит к круговому движению расплавленного металла, что улучшает однородность слитков. Верхний предел величины внешнего магнитного поля определяется началом разбрызгивания жидкого металла, обусловленным интенсивным перемешиванием расплава, поэтому для каждого режима плавки величина магнитного поля определяется экспериментальным путем [14].

Методология и методы исследования. Численное моделирование ЭВТ выполнялось в среде Ansys Fluent с использованием собственных подпрограмм,

написанных на языке C. Расчет магнитного поля выполнялся по закону Био-Савара-Лапласа, с использованием технологии параллельного программирования NVIDIA CUDA. Численные расчеты были проверены на сеточную сходимость и устойчивость.

Экспериментальные измерения скорости жидкого металла проводились тремя различными способами: корреляционным зондом [15-18], волоконно-оптическим [19-21] датчиком скорости и методом водородных меток. Для записи данных использовался аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) или видеокамера. Затем результаты обрабатывались на персональном компьютере.

Температура измерялась с использованием медно-константановых термопар корреляционного зонда, сигнал с которых усиливался и, при необходимости, фильтровался с использованием фильтра низкой частоты (ФНЧ) и фильтра высокой частоты (ФВЧ) Бесселя 3-го порядка, затем сигнал записывался на жесткий диск с использованием АЦП.

Более подробное описание применяемых методик численного и физического моделирования представлено в главах 2 и 3 диссертации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально установлено, что под действием магнитного поля Земли осевая скорость в области струи электровихревого течения эвтектического сплава In-Ga-Sn в полусферическом контейнере снижается примерно на 30–50 % по сравнению с режимом компенсации геомагнитного поля ($S = 10^7$ – 2×10^8 , $N = 1.6 \times 10^4$ – 1.8×10^6).

2. Автоколебательный режим электровихревого течения сплава In-Ga-Sn в полусферическом контейнере при влиянии внешнего осевого магнитного поля реализуется при $I = 400$ А и $B_z = 10^{-4}$ – 10^{-3} Тл ($S = 1.7 \times 10^8$, $N = 3.2 \times 10^6$ – 3.2×10^7) и обусловлен взаимодействием основного и вторичного торoidalных вихрей, для диапазона $B_z = 3 \times 10^{-4}$ – 10^{-3} Тл время формирования вторичного вихря составляет $t_{\text{обр}} \approx 1$ – 30 с, при этом оно, как и период автоколебаний, уменьшается с увеличением внешнего осевого магнитного поля.

3. Полученный критерий применимости электродинамического приближения для электровихревого течения жидкого металла In-Ga-Sn в полусферическом контейнере заключается в том, что при наличии внешнего осевого магнитного поля электродинамическое приближение справедливо для $B_z \lesssim 1.25 \times 10^{-3}$ Тл ($S = 10^5$, $St \lesssim 7.1 \times 10^{-3}$, $N \lesssim 9.8 \times 10^5$), а нарушение условия его применимости проявляется в завышении азимутальной скорости по сравнению с безындукционным приближением.

4. Обнаруженный эффект электромагнитного торможения электровихревого течения жидкого металла In-Ga-Sn в полусферическом контейнере под действием внешнего осевого магнитного поля $B_z \gtrsim 10^{-2}$ Тл ($S = 10^7$, $St \gtrsim 0.067$, $N \gtrsim 7.8 \times 10^7$) обусловлен возникновением электрических токов, индуцированных движением электропроводящей среды, и взаимодействием этих токов с внешним магнитным полем.

Достоверность результатов. Численное моделирование выполнялось в среде Ansys Fluent, собственные программы и подключаемые к среде модули были проверены на задачах, имеющих аналитические решения. Полученные экспериментальные данные качественно и, в ряде режимов, количественно согласуются

с результатами численного моделирования, при этом ряд особенностей течения, выявленных в расчетах и экспериментах, соответствует литературным данным других авторов.

Апробация работы. Основные результаты работы представлялись и обсуждались на российских и международных научных конференциях:

1. XIII Всероссийская школа-конференция с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск 2014).
2. XXI Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Санкт-Петербург 2017).
3. Седьмая и восьмая Российские национальные конференции по теплообмену (Москва 2018 и 2022).
4. II, III и IV Всероссийские научные конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта 2017, 2018 и 2019).
5. Третья Российская конференция по магнитной гидродинамике (Пермь 2018).
6. Семинар вузов по теплофизике и энергетике: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (Санкт-Петербург 2019).
7. X Всероссийская конференция «Пермские гидродинамические научные чтения» (Пермь, 2025).

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственных заданий ОИВТ РАН, при поддержке РФФИ (проект № 13-08-90444 укр-ф-а) и РНФ (проект № 17-19-01745).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.3.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» (отрасль физико-математические науки) по п. 3 «Магнитная гидродинамика электропроводных сред» в части экспериментальных и численных исследований закономерностей электровихревых течений электропроводящей жидкости при влиянии внешнего осевого магнитного поля.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в материалах конференций и в 13 статьях в научных изданиях, 11 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК или входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus.

Личный вклад. Автор внес решающий вклад в проведение исследований на всех этапах работы. Результаты исследований опубликованы в соавторстве. При подготовке публикаций автор принимал непосредственное участие в обсуждении и интерпретации полученных результатов. Диссертация написана автором лично. Все научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично. Автором лично выполнены обработка, анализ, научное обобщение и формулирование результатов на основе экспериментальных и расчетных данных, полученных в большинстве случаев автором лично, либо при его непосредственном участии. Положения, выносимые на защиту, сформулированы лично автором.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 129 страниц содержит 73 рисунка, 5 таблиц и 102 ссылки на литературные источники. Работа включает введение, четыре главы и заключение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены основные технологические процессы, в которых имеют место ЭВТ, описаны методики экспериментального изучения этих течений, изложена актуальность, новизна, цели диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор литературы применительно к ЭВТ, рассмотрены теоретические, экспериментальные и расчетные работы, а также отдельно проанализированы труды, посвященные ЭВТ при наличии внешнего осевого магнитного поля.

Во второй главе описана экспериментальная установка и методы измерений скорости течения. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Экспериментальная установка состоит из медного полусферического контейнера (большого электрода диаметром 188 мм), заполненного эвтектическим сплавом In-Ga-Sn. В центр полусферы введен малый полусферический электрод, погруженный на глубину, равную радиусу. Диаметр малого электрода может изменяться в пределах 1–20 мм. Постоянный ток подводится по токоподводу от источника, собранного по схеме Ларионова. Поля усредненной скорости и осциллограммы температуры жидкого металла регистрировались термопарами корреляционного датчика. Волоконно-оптическим датчиком скорости проводились тонкие измерения осцилляций скорости течения жидкого металла. Сигналы с зондов поступали в восьмиканальный усилитель с регулируемым коэффициентом усиления 1–3000, где при необходимости проходили предварительную фильтрацию (ФНЧ и ФВЧ Бесселя 3-го порядка). Далее данные оцифровывались с использованием АЦП (Ла-2М5 PCI или Ла-2М3 ISA) производства фирмы «Руднев-Шилиев» и сохранялись на жесткий диск персонального компьютера для последующей обработки. Внешнее осевое магнитное поле создавалось соленоидом, обеспечивающим индукцию 0.1 Тл при токе 100 А, что позволяло изучать влияние вертикального магнитного поля на электровихревое течение в расплаве.

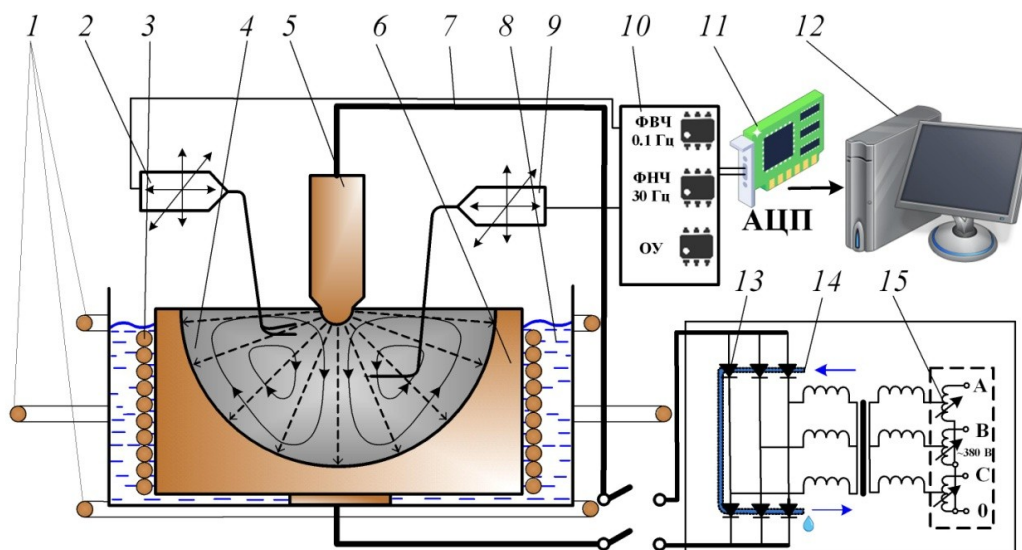


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки. 1 – катушка Максвелла, 2 – корреляционный зонд, 3 – соленоид, 4 – эвтектический сплав In-Ga-Sn, 5 – малый электрод, 6 – полусферический контейнер (большой электрод), 7 – токоподвод, 8 – охлаждающая жидкость, 9 – волоконно-оптический датчик скорости, 10 – усилитель и фильтры, 11 – аналого-цифровой преобразователь, 12 – ЭВМ, 13 – силовые диоды, 14 – рубашка охлаждения диодов, 15 – лабораторные автотрансформаторы.

Для измерения скорости и температуры использовался корреляционный зонд, схема которого приведена на рис. 2а. Для зонда использовались трехпроводные медно-константановые термопары собственного изготовления, диаметр проводов составлял 0.08 мм, а диаметр чувствительного королька 0.3 мм. Расстояние между термопарами было измерено микроскопом МБС-10 и составляло $L = 4.7$ мм. Чувствительность термопар составляла 40 мкВ/К. Провода были помещены в трубку из нержавеющей стали, которая была заземлена.

Принцип работы корреляционного зонда схематично показан на рис. 2б. Турбулентный поток жидкого металла направлен по оси z и пульсация температуры приходит сначала на термопару 1, а затем спустя время $\tau_{\max}$ на вторую термопару.

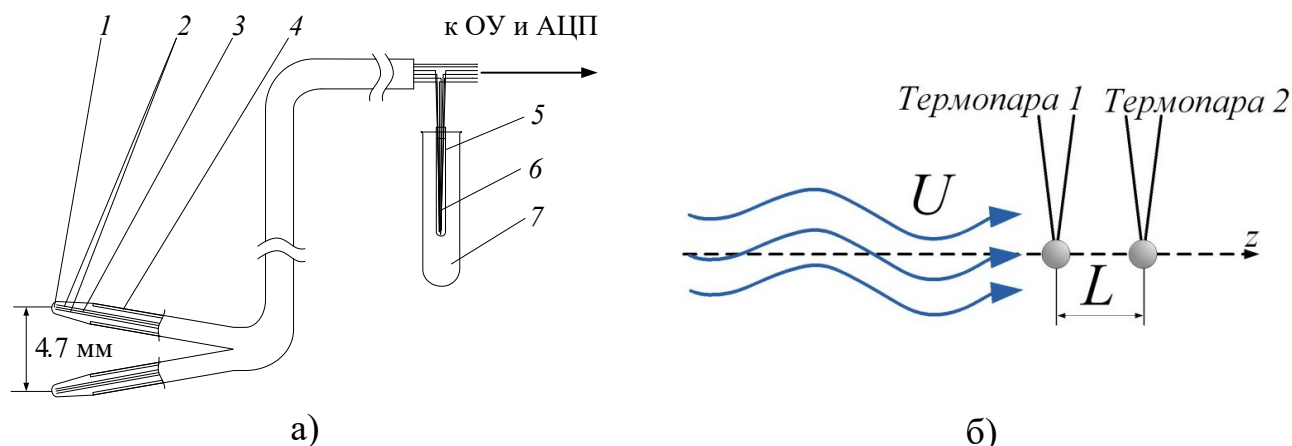


Рисунок 2 – а) Принципиальная схема корреляционного зонда. 1 – горячий спай термопары, 2 – медные провода, 3 – константановый провод, 4 – корпус (трубка из нерж. стали), 5 – стеклянная пробирка, заполненная парафином, 6 – холодный спай термопары, 7 – сосуд Дьюара. б) Принцип измерения скорости корреляционным зондом.

Сигналы с термопар поступают на АЦП персонального компьютера, время сбора данных составляло 30–120 с (экспериментально было установлено, что такое время сбора данных является оптимальным для измерения скорости корреляционным методом). Затем выполнялся расчет корреляционной функции для сигналов с двух термопар. Максимум корреляционной функции соответствует среднему времени задержки $\tau_{\max}$ прихода температурной пульсации на вторую термопару. Таким образом, средняя скорость рассчитывалась как $U_z = L/\tau_{\max}$.

Для измерения мгновенной скорости жидкого металла использовался волоконно-оптический датчик скорости, принципиальная схема которого представлена на рис. 3. Оптико-механическая часть преобразователя включает в себя стеклянный конус 1 диаметром ~ 1 мм и длиной ~ 10 мм, при этом диаметр вершины конуса составляет ~ 50 мкм. В тонкую часть конуса был помещен цилиндрический стеклянный указатель 2 диаметром ~ 20 мкм и длиной ~ 2 мм. Также в стеклянный конус вставлены два Г-образных световода, таким образом, что конец стеклянного указателя находится в зазоре между световодами. От светодиода 4 свет проходил по световоду и через воздушный зазор и попадал на фотодиод 5.

Под действием потока жидкого металла стеклянный конус изгибался и приводил к изменению положения стеклянного указателя, который затенял приемный световод. Таким образом, интенсивность светового потока на фотодиоде и электрический сигнал с него оказывались связанными со скоростью потока жидкого металла. Тарировка волоконно-оптического преобразователя скорости проводи-

лась в воздушной струе, после чего характеристику датчика пересчитывали с воздуха на жидкий металл.

Скорость на поверхности жидкого металла определялась следующим образом, поверхность заливалась смесью 1:1 воды и 40 % раствора серной кислоты, при этом происходила химическая реакция с оксидами индия, олова и галлия ($\text{Ga}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$). После того как оксидная пленка полностью прореагировала, начиналась реакция с жидким металлом ($2\text{Ga} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Ga}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2 \uparrow$) и происходило выделение пузырьков водорода (рис. 4). Далее выполнялся процесс видеосъемки с частотой 29.97 кадров/с на фотокамеру Canon 550D. Затем видеокадры обрабатывались в собственной программе, и определялась азимутальная скорость на поверхности жидкого металла.

Также была проведена оценка погрешности измерений. Для корреляционного зонда абсолютная погрешность определения температуры составляет 0.18°C . При этом погрешность определения скорости в большинстве режимов составляла 6–15 %. В некоторых режимах погрешность достигала 35 %, это связано с различной турбулизацией потока жидкого металла. Относительная погрешность ВОПС не превышает 10 % в диапазоне измеряемых скоростей 50–200 мм/с. Типичная погрешность определения азимутальной скорости на поверхности жидкого металла составляла 7.5 %.

В третьей главе описаны методы численного моделирования поля скорости ЭВТ. В работе решалось уравнение движения (1) с электромагнитной силой в качестве источника, наряду с уравнением неразрывности (2) для несжимаемой жидкости:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \rho \nu \Delta \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{эл.}}, \quad \mathbf{F}_{\text{эл.}} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

Здесь, $\mathbf{U}$ – скорость, t – время, p – давление, $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения, ρ – плотность, ν – вязкость, $\mathbf{F}_{\text{эл.}}$ – электромагнитная сила, $\mathbf{J}$ – суммарная плотность электрического тока, $\mathbf{B}$ – суммарное магнитное поле, созданное этим током.

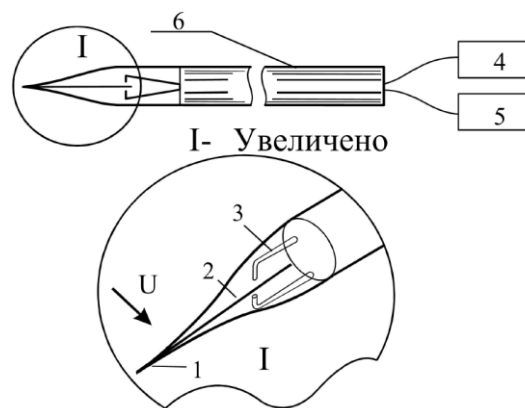


Рисунок 3 – Схема волоконно-оптического преобразователя скорости. 1 – стеклянный конус (чувствительный элемент), 2 – указатель, 3 – световод, 4 – излучатель, 5 – фотоприемник, 6 – корпус.



Рисунок 4 – Пузырьки водорода на поверхности жидкого металла In-Ga-Sn.

Для вычисления электромагнитной силы, сначала вычислялись плотность электрического тока и собственное магнитное поле из аналитических выражений (3) в сферической системе координат, либо с использованием уравнения для потенциала (4) и закона Био-Савара-Лапласа (5):

$$J_R(R) = \frac{I}{2\pi R^2}, \quad B_\varphi(R, \theta) = \frac{\mu_0 I (1 - \cos\theta)}{2\pi R \sin\theta}, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \Phi) = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{U} \times \mathbf{B}), \quad \mathbf{J} = -\sigma \nabla \Phi, \quad (4)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{R}_0) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{\mathbf{J} \times (\mathbf{R}_0 - \mathbf{R})}{|\mathbf{R}_0 - \mathbf{R}|^3} dV, \quad (5)$$

здесь, Φ – электрический потенциал (задавался $\Phi_1 = \Phi$ на верхней границе и $\Phi_2 = 0$ на нижней границе), $\mathbf{R}_0$ – радиус-вектор точки, в которой ищется магнитное поле, $\mathbf{R}$ – текущая точка объема, создающая МП, V – объем.

Численное моделирование проводилось на сетках различной плотности в осесимметричной и трехмерной постановках, основная часть расчетов выполнена в осесимметричной постановке. При этом использовались различные МГД приближения для вычисления электромагнитной силы (6):

$$\mathbf{F}_{\text{эл.}} = (\mathbf{J} + \mathbf{J}_{\text{инд.}}) \times (\mathbf{B}_{\text{ЭВТ.}} + \mathbf{B}_{\text{внеш.}} + \mathbf{B}_{\text{инд.}}), \quad (6)$$

где $\mathbf{J}_{\text{инд.}}$ – электрические токи, индуцированные движением электропроводящей среды, $\mathbf{B}_{\text{ЭВТ.}}$ – собственное магнитное поле, созданное током проводимости $\mathbf{J}$, $\mathbf{B}_{\text{внеш.}}$ – внешнее магнитное поле (имеет только B_z компоненту), $\mathbf{B}_{\text{инд.}}$ – магнитное поле, созданное токами $\mathbf{J}_{\text{инд.}}$.

В случае использования электродинамического приближения пренебрегают электрическими токами, индуцированными движением жидкого металла ($\mathbf{J}_{\text{инд.}} = 0$, $\mathbf{B}_{\text{инд.}} = 0$). При использовании безындукционного приближения учитываются электрические токи $\mathbf{J}_{\text{инд.}}$, но магнитным полем, индуцированным этими токами, пренебрегают ($\mathbf{B}_{\text{инд.}} = 0$). Когда решается полная МГД задача, учитываются и электрические токи $\mathbf{J}_{\text{инд.}}$ и созданное ими МП $\mathbf{B}_{\text{инд.}}$.

Следует отметить, что при решении уравнения движения с электромагнитной силой вычисления производились на неструктурированной сетке с использованием k - ω SST модели турбулентности. При решении уравнения движения использовались схемы 3-го порядка точности MUSCL. На границах объема с расплавом было задано условие прилипания ($\mathbf{U}=0$), а на верхней границе, либо условие прилипания $\mathbf{U}=0$, либо равенство нулю касательных напряжений. Вычисления проводились в среде Ansys Fluent, а расчет магнитного поля и электромагнитной силы выполнялся с использованием своих собственных программ и подпрограмм.

Основные используемые критерии подобия в ЭВТ представлены в таблице 1. Длина R_2 характеризует линейный размер (радиус полусферического контейнера), число S является аналогом числа Рейнольдса в ЭВТ и называется параметром электровихревого течения, параметр N характеризует степень влияния внешнего МП, а число Стюарта St характеризует, насколько велики силы Лоренца по сравнению с инерцией потока.

Четвертая глава посвящена результатам исследования ЭВТ при влиянии внешнего МП различной величины. Были получены численно-экспериментальные

данные о структуре и характеристиках ЭВТ без внешнего МП, при наличии магнитного поля Земли, изучен процесс образования вторичного противонаправленного тороидального вихря при наличии внешнего МП умеренной величины, исследована применимость различных МГД приближений при численном моделировании ЭВТ с внешним МП, получена структура течения для МП до 1 Тл.

Таблица 1 – Основные критерии подобия в ЭВТ.

Безразмерный параметр	Формула
Длина	R_2
Параметр S	$S = Re^2 = \mu_0 I^2 / \rho v^2$
Параметр N	$N = B_z I R_2 / \rho v^2$
Число Стюарта St	$St = B^2 \sigma R_2 / \rho U$

Результаты исследования ЭВТ при отсутствии внешних МП. Эксперименты по измерению осевой скорости в ЭВТ проводились без внешних МП. Однако на установку действовало МП Земли ($B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл) и для компенсации его осевой компоненты использовалась катушка Максвелла, неоднородность МП которой не превышала 0.4 %. В ходе эксперимента с компенсацией, МП контролировалось магнетометром LakeShore DSP475 и не превышало 3×10^{-6} Тл. Корреляционный зонд находился в жидком металле, а измерения проводились на оси симметрии $r = 0$ и глубине $z = 20$ мм. Значение электрического тока составляло $I = 100\text{--}450$ А ($S = 10^7\text{--}2 \times 10^8$, $N = 1.6 \times 10^4\text{--}1.8 \times 10^6$).

Корреляционным методом была получена зависимость осевой скорости от величины электрического тока, пропускаемого через жидкий металл (рис. 5). С ростом электрического тока скорость течения возрастает. При наличии магнитного поля Земли осевая скорость жидкого металла в области струи уменьшается примерно на 30–50 % по сравнению с режимом компенсации геомагнитного поля. Это связано с появлением азимутальной закрутки и перестройкой течения. Этот эффект ранее наблюдался при влиянии МП искусственного происхождения (токоподводы, соленоид), а также был выявлен при численных расчетах, однако экспериментально был получен впервые в данной постановке.

Результаты исследования вихреобразования в ЭВТ. Экспериментальные исследования параметров течения выполнялись при значении внешнего МП $B_z = 10^{-4}\text{--}10^{-3}$ Тл, а электрический ток, пропускаемый через жидкий металл, был равен $I = 400$ А ($S = 1.7 \times 10^8$, $N = 3.2 \times 10^6\text{--}3.2 \times 10^7$).

На первом этапе экспериментальных исследований были проведены измерения пульсаций температуры. Для увеличения температурных пульсаций использовался малый электрод, изготовленный из нержавеющей стали с диаметром $d = 5$ мм. Измерения проводились с

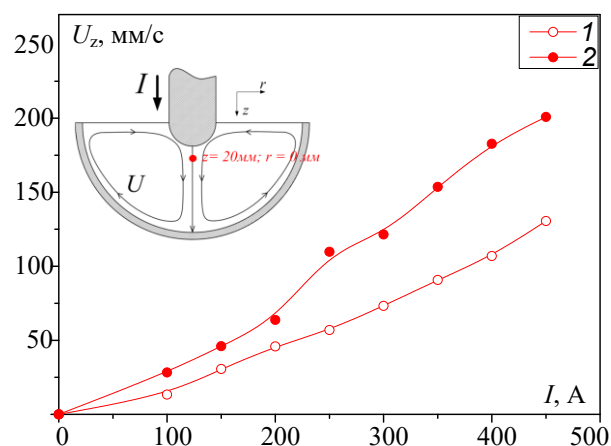


Рисунок 5 – Зависимость осевой скорости от электрического тока на глубине $z = 20$ мм. 1 – катушка

Максвелла выключена ($B_z = B_{\text{зем.}} = 5 \times 10^{-5}$ Тл), 2 – катушка Максвелла включена ($B_z = 3 \times 10^{-6}$ Тл).

использованием термопар корреляционного зонда. Датчик был помещен в точку, расположенную на оси симметрии $r = 0$ мм и на глубине $z = 10$ мм.

Сначала с помощью стабилизированного источника тока через соленоид пропусклся электрический ток для генерации требуемого внешнего осевого МП, затем включалась экспериментальная установка и проводились измерения пульсаций температуры. В конце каждого эксперимента установка обесточивалась на 600 с и далее проводились исследования при других значениях МП.

Также было выполнено численное моделирование гидродинамики ЭВТ. На поверхностях контакта жидкого металла со стенками накладывалось условие прилипания ($U = 0$). Были получены поля скорости и линии тока жидкости в различные моменты времени, что позволило определить структуру ЭВТ (рис. 6). При $B_z = 0$ Тл имеет место одиночный тороидальный вихрь, при $B_z = 10^{-4}$ Тл образуется второй вихрь, и вихри взаимодействуют друг с другом (автоколебания), это т.н. застойный режим, когда интенсивность течения минимальна. При $B_z \approx 7 \times 10^{-5}$ Тл вторичный вихрь не формируется, и автоколебания отсутствуют, а при МП $B_z \geq 5 \times 10^{-3}$ Тл вторичный вихрь вытесняет первичный к периферии, вследствие чего автоколебания прекращаются.

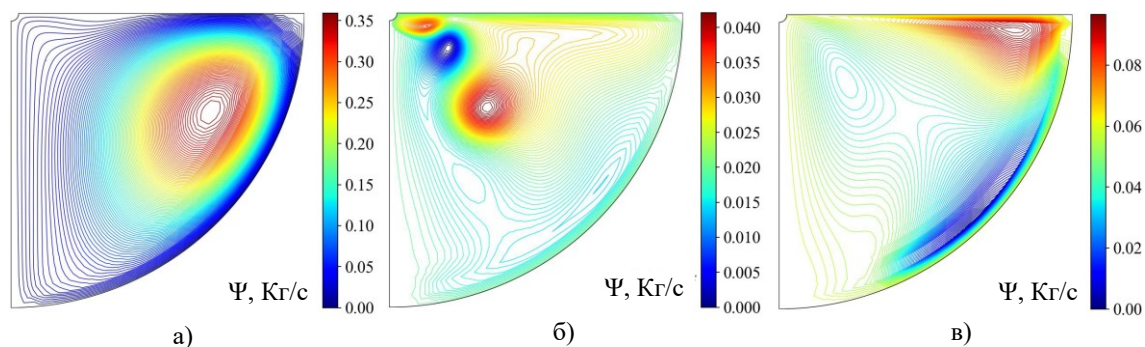


Рисунок 6 – Структура ЭВТ при различных внешних МП. а) $B_z = 0$ Тл, б) 10^{-4} Тл, в) 5×10^{-3} Тл.

Численно и экспериментально был исследован период автоколебаний в зависимости от величины внешнего МП (рассчитанные колебания скорости и экспериментально полученные колебания температуры). На рис. 7 представлена зависимость периода колебаний от величины внешнего МП. При этом численные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются, в обоих случаях наблюдается уменьшение периода колебаний с ростом величины внешнего МП.

Затем с использованием волоконно-оптического датчика скорости было исследовано время образования восходящего тороидального вихря в зависимости от величины внешнего МП. Датчик располагался на оси симметрии $r = 0$ мм и на глубине $z = 10$ мм. Сначала были получены осциллограммы скорости жидкого металла, а затем зависимость времени образования вторичного вихря от внешнего магнитного поля. На рис. 8 представлены численная и эксперимен-

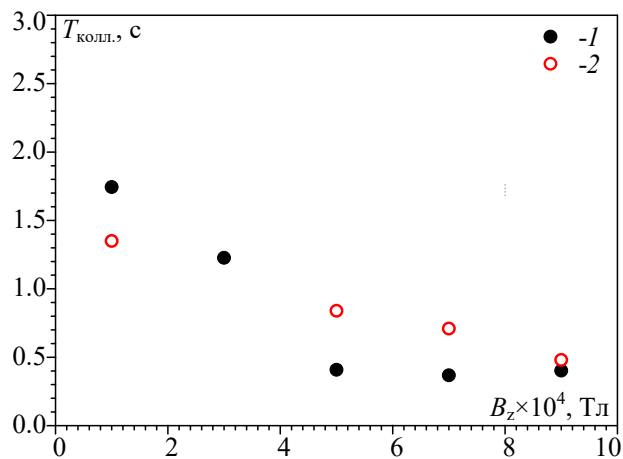


Рисунок 7 – Зависимость периода колебаний от МП. 1 – расчет, 2 – эксперимент.

тальная зависимости времени образования второго вихря от величины внешнего МП. При этом режим I^* – это расчетное время образования второго вихря, однако, затем вихрь исчезает, далее второй вихрь образуется снова, после чего система приходит к квазистационарному режиму, время наступления которого показано кривой 1 (результат численного моделирования) и кривой 2 (экспериментальный результат). Полученная зависимость имеет убывающий характер.

Затем было проведено численное исследование по определению границы раздела зон одновихревого и двухвихревого течений, в координатах $B_z(I)$ ($I = 1-1000$ А, $B_z = 10^{-5}-1.4 \times 10^{-4}$ Тл, $S = 10^3-10^9$, $N = 788-1.1 \times 10^7$). Расчеты были выполнены при различном отношении размеров малого и большого электродов (R_1/R_2). Результат представлен на рис. 9, при этом выше границы раздела имеет место двухвихревое течение, а ниже – одновихревое, при этом форма границ близка к зависимостям типа $y \sim A\sqrt{x}$. Следует отметить, что для электрических токов

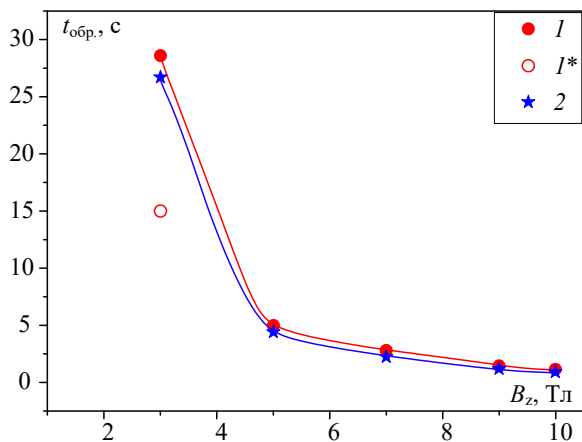


Рисунок 8 – Зависимость времени образования второго вихря от внешнего МП. 1, 1* – расчет, 2 – эксперимент.

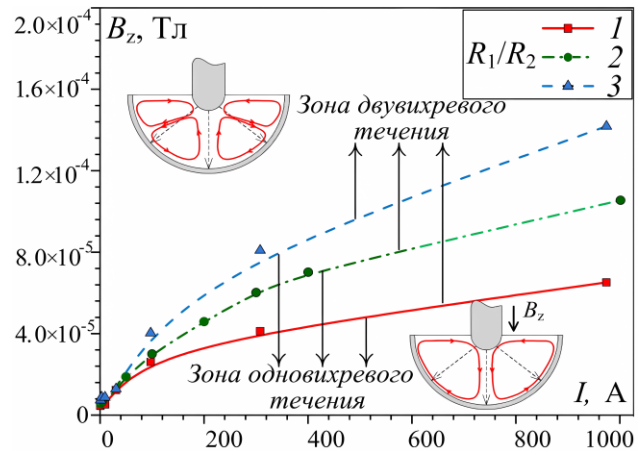


Рисунок 9 – Границы раздела зон одновихревого и двухвихревого течений. $I - R_1/R_2 = 1/10$, 2 – $1/37.6$, 3 – $1/100$.

100 и 200 А при влиянии МП Земли, второй вихрь образуется, но время его появления составляет порядка 700 с, таким образом, в начальный момент времени имеет место одиночный тороидальный вихрь (со слабой азимутальной закруткой течения), как показано в экспериментах по измерению осевой скорости корреляционным зондом.

Исследование применимости различных МГД приближений. Для экспериментально-численного исследования применимости электродинамического приближения были выбраны режимы, в которых сила электрического тока, пропускаемого через жидкий металл $I = 10$ А, а внешнее осевое магнитное поле менялось в диапазоне от 10^{-3} Тл до 2×10^{-2} Тл ($S = 10^5$, $N = 7.8 \times 10^5-1.6 \times 10^7$, $St = 4.8 \times 10^{-3}-0.55$). Режим $I = 10$ А был выбран по причине того, что при таких токах азимутальная закрутка не приводила к прогибу поверхности под малым электродом. Скорость на поверхности жидкого металла измерялась методом водородных меток.

Также было выполнено численное моделирование гидродинамики ЭВТ. На всех границах, кроме поверхности жидкого металла, было задано условие прилипания $U = 0$, а на свободной поверхности металла принималось условие равенства нулю касательных напряжений. Окончание численного расчета соответствовало

времени выхода на стационарный или квазистационарный режим поля скорости жидкого металла.

На рис. 10 представлен график зависимости максимальной азимутальной скорости ($r = 10$ мм) от величины внешнего осевого МП, видно, что разница между ЭД и БИ приближениями достигает 10 % при внешнем МП $B_z = 1.25 \times 10^{-3}$ Тл ($S = 10^5$, $St = 7.1 \times 10^{-3}$, $N = 9.8 \times 10^5$). Следовательно, при таком и большем значении внешнего МП, требуется выполнить численное моделирование, используя БИ приближение, или решать полную МГД задачу, поскольку ЭД приближение дает сильно завышенные и поэтому ошибочные значения азимутальной скорости.

Чтобы объяснить эффект уменьшения скорости закрутки жидкого металла при использовании безындукционного приближения, запишем уравнение для азимутальной компоненты силы в электродинамическом (7) и безындукционном приближениях (8):

$$F_\phi(r, z) = -J_r B_z, \quad (7)$$

$$F_{\phi_{\text{БИ}}}(r, z) = -(J_r B_z + \sigma U_\phi B_z^2) + \sigma U_z B_\phi B_z. \quad (8)$$

Азимутальная компонента силы приводит к возникновению азимутальной скорости, а увеличение внешнего магнитного поля B_z усиливает слагаемое $\sigma U_\phi B_z^2$, в которое входит квадрат магнитного поля и величина U_ϕ со знаком «минус». Поскольку азимутальная скорость направлена вдоль основной составляющей силы $J_r B_z$, указанное слагаемое уменьшает азимутальную электромагнитную силу. При этом использование ЭД приближения приводит к завышенной оценке азимутальной скорости, поскольку в выражении для электромагнитной силы в данном приближении не учитывается слагаемое $\sigma U_\phi B_z^2$.

Затем было решено проверить границы применимости БИ приближения. Поскольку влияние индуцированных токов сильнее для металла с большой электропроводностью σ , были проведены расчеты для различных лабораторных жидких металлов, свойства которых представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Физические свойства электропроводящих жидкостей

Жидкость	Электропроводность σ , См/м	Плотность ρ , кг/м ³	Вязкость ν , м ² /с
Hg	1×10^6	13600	10^{-7}
In-Ga-Sn	3.3×10^6	6450	4.3×10^{-7}
Na	10^7	930	7.7×10^{-7}

Таким образом, были получены зависимости максимальных азимутальной и осевой скоростей от величины внешнего МП, в диапазоне от 5×10^{-2} до 1 Тл (рис. 11). При этом $St = 0.729 - 4 \times 10^4$, $N = 4 \times 10^7 - 8 \times 10^8$. Из графиков видно, что с ростом внешнего МП наблюдается рост скоростей, а при достижении некоторого

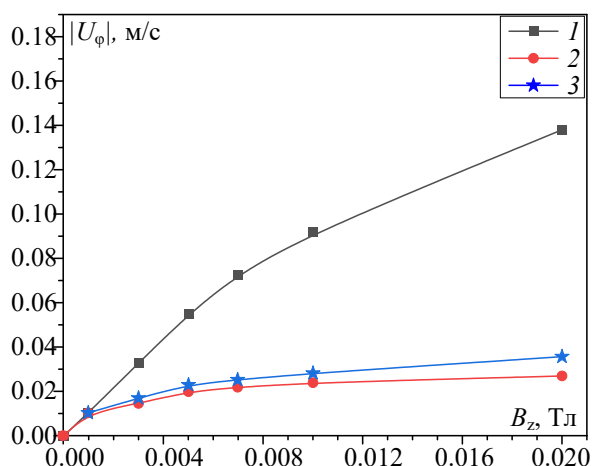


Рисунок 10 – Зависимость азимутальной скорости на поверхности жидкого металла от величины внешнего МП, $I = 10$ А, $r = 10$ мм. 1 – расчет в ЭД приближении, 2 – расчет в БИ приближении, 3 – эксперимент.

значения МП, начинается уменьшение скоростей жидкого металла, это связано с тем, что индуцированные токи тормозят движение жидкости. Вместе с тем показано, что режимы с электрическими токами порядка десятков – сотен ампер и внешними МП порядка 1 Тл не требуют решения полной МГД задачи.

Тем не менее, важно определить, при каких электрических токах и внешних МП следует решать полную МГД задачу. Поэтому было проведено численное моделирование и получены зависимости азимутальной/осевой скоростей от величины электрического тока (500–12000 А), пропускаемого через жидкий металл. Внешнее осевое МП было принято $B_z = 0.1$ Тл, а в качестве рабочей жидкости использовался натрий – жидкий металл, обладающий максимальной электропроводностью ($S = 5.7 \times 10^8 - 3.2 \times 10^{11}$, $N = 8.5 \times 10^9 - 2 \times 10^{11}$, $Re_m = 0.3 - 3.5$). В данном случае на всех границах жидкого металла было задано условие прилипания $U = 0$.

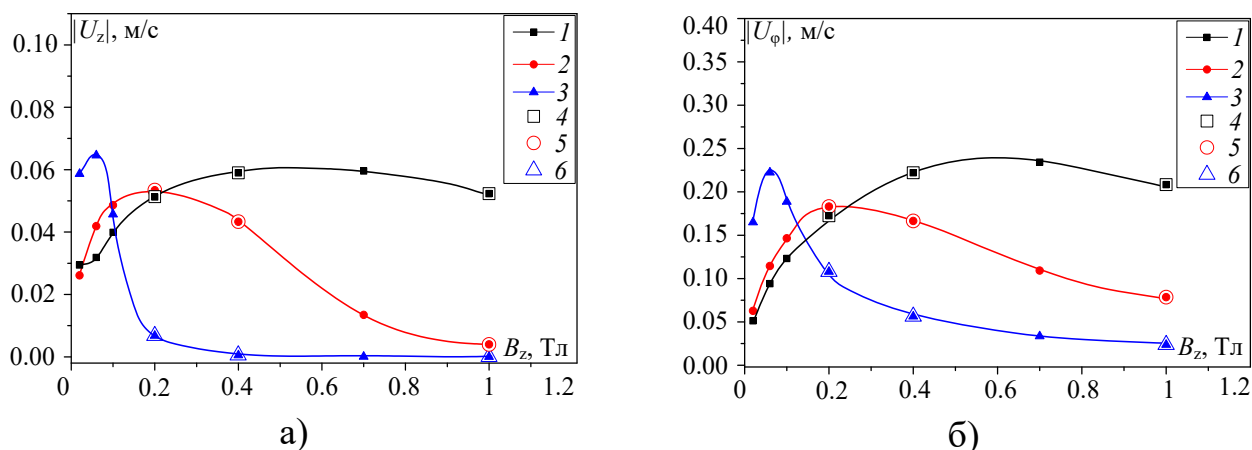


Рисунок 11 – а) Зависимость максимальной осевой скорости от внешнего МП, б) Зависимость максимальной азимутальной скорости от внешнего МП. БИ приближение: 1 – Hg, 2 – In-Ga-Sn, 3 – Na. Полная МГД задача: 4 – Hg, 5 – In-Ga-Sn, 6 – Na.

На рис. 12 представлены расчетные зависимости максимальных азимутальной и осевой скорости от величины электрического тока, пропускаемого через жидкий металл. Из графиков видно, что максимальные азимутальные скорости, при расчете в БИ приближении и при решении полной МГД задачи, отличаются примерно на 1.5 % при токе 12000 А, а различие между вычисленными осевыми скоростями достигает 10 % при $I = 3000$ А.

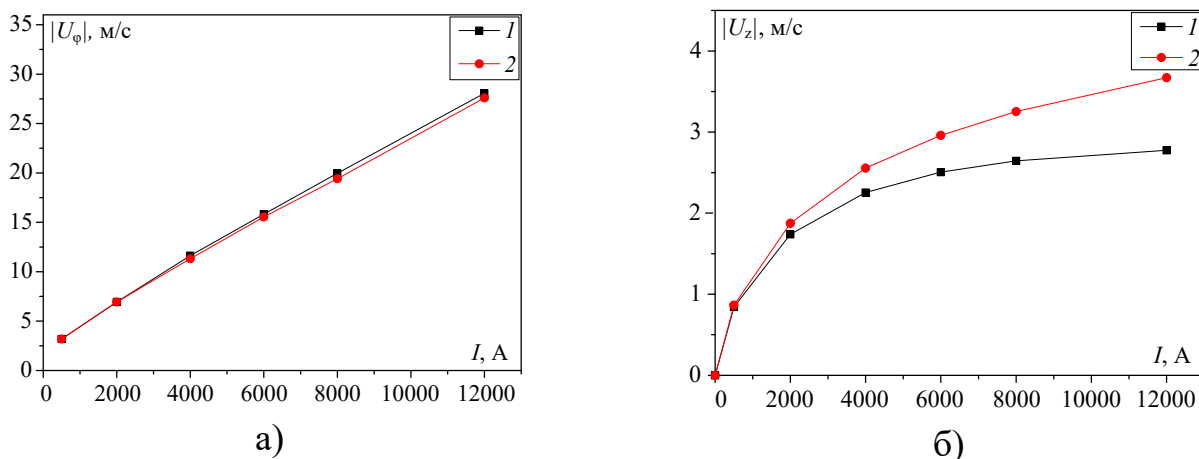


Рисунок 12 – а) Зависимость максимальной азимутальной скорости от тока I при внешнем МП 0.1 Тл (Na), б) зависимость максимальной осевой скорости от тока I при внешнем МП 0.1 Тл (Na). 1 – БИ приближение, 2 – Полная МГД задача.

Отметим, что полученные характерные скорости течения превышают типичные значения, реализуемые в промышленных металлургических агрегатах. Для большинства таких установок магнитное число Рейнольдса, как правило, остается меньше единицы, тогда как в рассматриваемых режимах оно достигает $Re_m \approx 0.3\text{--}3.5$. Следовательно, для большинства промышленных условий достаточно использовать БИ приближение при численном моделировании ЭВТ.

Исследование параметров и структуры ЭВТ в широком диапазоне внешних МП. Было выполнено численное моделирование гидродинамики ЭВТ в диапазоне электрических токов от 100 до 1000 А и в диапазоне внешних МП $B_z = 5 \times 10^{-5} \text{--} 1$ Тл ($S = 10^7\text{--}10^9$, $N = 4 \times 10^5\text{--}7.8 \times 10^{10}$, $St = 4 \times 10^{-5}\text{--}5 \times 10^4$), следует отметить, что $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл соответствует МП Земли. На всех границах было задано условие прилипания $U = 0$, а на поверхности жидкого металла принималось условие равенства нулю касательных напряжений. Численное моделирование выполнялось с использованием БИ приближения. Было получено поле скорости течения жидкого металла, а также структура течения с использованием линий тока скорости. Также была вычислена полная кинетическая энергия системы для каждого режима (9):

$$E_k = \frac{\rho}{2} \int_V |\mathbf{U}|^2 dV. \quad (9)$$

Зависимость полной кинетической энергии от величины внешнего МП представлена на рис. 13, при этом горизонтальная ось поделена на зоны, и каждая из них соответствует определенной структуре течения. Рассмотрим зону I, при значении электрического тока $I = 100$ А

и $I = 200$ А с внешним МП $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл имеет место течение с двумя тороидальными вихрями. Для режимов $I = 400\text{--}600$ А наблюдается система из одного тороидального вихря при $B_z < 10^{-4}$ Тл, а для режимов $I = 800\text{--}1000$ А – при $B_z < 2 \times 10^{-4}$ Тл. Таким образом, для электрических токов $I = 400\text{--}1000$ А внешнего МП $B_z = 5 \times 10^{-5}$ Тл недостаточно для образования второго вихря. Восходящий вихрь образуется, при больших значениях внешнего МП, по сравнению с режимами $I = 100$ А и $I = 200$ А. Поэтому зона I соответствует

структуре течения, представленной на рис. 14 (одиночный тороидальный вихрь со слабой азимутальной закруткой течения). Зоны II–III соответствуют минимуму полной кинетической энергии течения и переходу к двухвихревому режиму течения, сопровождающемуся автоколебаниями в жидком металле. В зоне II вблизи малого электрода наблюдается выраженная область автоколебаний, которая с увеличением интенсивности внешнего магнитного поля уменьшается, переходя в зону III, при этом в некоторых режимах возможно образование локальных вихрей. Зона IV соответствует подавлению первичного тороидального вихря вторичным и

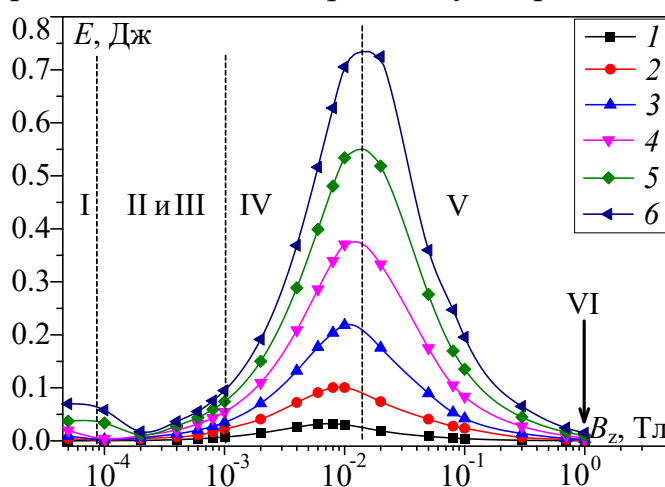


Рисунок 13 – Зависимость полной кинетической энергии течения от внешнего МП, 1 – 100 А, 2 – 200 А, 3 – 400 А, 4 – 600 А, 5 – 800 А, 6 – 1000 А.

оттеснением его на периферию контейнера с жидким металлом (рис. 14 IV). При этом полная кинетическая энергия начинает возрастать и достигает максимума при внешнем МП $B_z \sim 10^{-2}$ Тл. Также для больших токов характерен небольшой сдвиг максимума вправо по горизонтальной оси (рис. 13). В зоне V кинетическая энергия течения начинает уменьшаться, это связано с электромагнитным торможением течения под действием индуцированных токов. Структура течения имеет вид, представленный на рис. 14 V, где имеется только восходящий тороидальный вихрь, который полностью подавил первичный. Затем течение ужимается в область, расположенную под малым электродом (ось симметрии) (рис. 14 VI). В остальном объеме образуется застойная зона и интенсивность течения минимальна.

Зависимость азимутальной скорости от внешнего магнитного поля представлена на рис. 15. Для случая $r = 10$ мм – азимутальная скорость увеличивается до максимума (диапазон внешнего МП $B_z \sim 2 \times 10^{-1} - 7 \times 10^{-1}$ Тл) и затем уменьшается. Такая же ситуация и для случая $r = 80$ мм, но диапазоны максимума азимутальной скорости составляют $B_z \sim 8 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-2}$ Тл. При сильном внешнем магнитном поле (~ 0.2 Тл) имеется зона течения вблизи малого электрода (где течение достаточно интенсивно) и зона течения вблизи большого электрода (течение подавлено внешним магнитным полем).

Для апробации численной модели был проведен эксперимент и получена зависимость азимутальной скорости от величины внешнего МП при электрическом токе $I = 100$ А. Измерения проводились с использованием водородных меток в точке $z = 0$ (поверхность жидкого металла) и $r = 80$ мм.

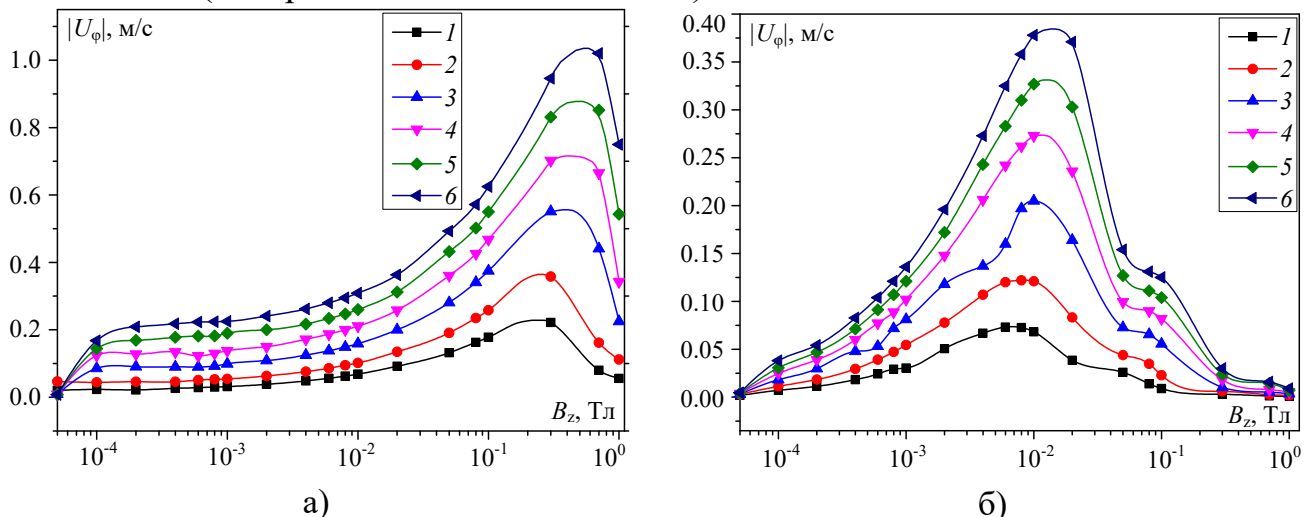


Рисунок 15 – Зависимость азимутальной скорости от внешнего МП на поверхности жидкого металла $z = 0$ мм. а) Расстояние от оси симметрии $r = 10$ мм, б) $r = 80$ мм.

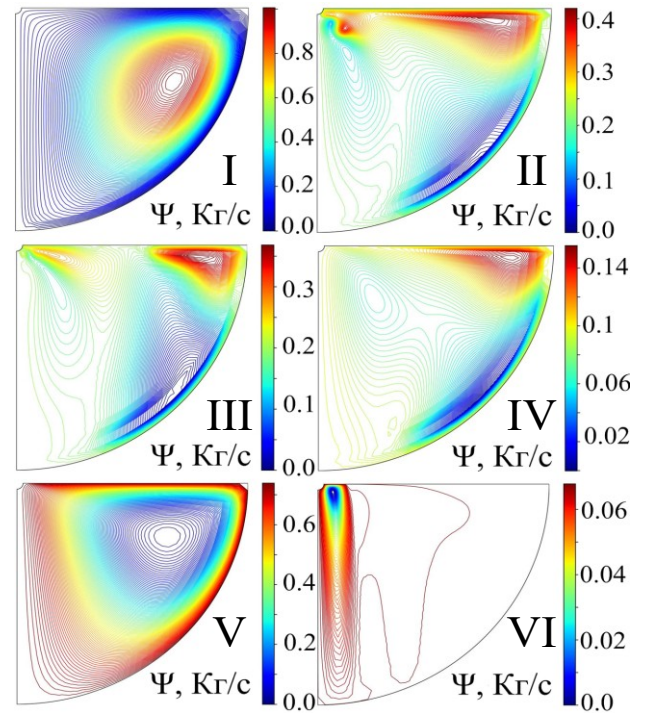


Рисунок 14 – Изменение структуры ЭВТ с ростом внешнего МП.

Результаты, представленные на рис. 16, показывают, что как численно, так и экспериментально наблюдается максимум азимутальной скорости при внешнем МП $\sim 10^{-2}$ Тл ($S = 10^7$, $St = 0.067$, $N = 7.8 \times 10^7$), а затем скорость начинает уменьшаться вследствие электромагнитного торможения течения.

В **заклучении** изложены основные результаты диссертационной работы:

Исследовано ЭВТ с компенсацией и без МП Земли, измерения проведены для электрических токов 100–450 А ($S = 10^7$ – 2×10^8 , $N = 1.6 \times 10^4$ – 1.8×10^6). Получены зависимости осевой скорости от электрического тока. Экспериментально показано, что при наличии магнитного поля Земли осевая скорость жидкого металла в области струи для исследованных режимов уменьшается примерно на 30–50 %. Таким образом, уменьшение осевой скорости может быть вызвано не только МП искусственного происхождения, но и МП Земли (соответствует положению 1).

Исследованы характеристики автоколебаний в жидком металле, которые вызваны взаимодействием первичного и противонаправленного вторичного тороидального вихря. Расчеты и эксперименты проводились для электрического тока 400 А и МП 10^{-4} – 10^{-3} Тл ($S = 1.7 \times 10^8$, $N = 3.2 \times 10^6$ – 3.2×10^7). Показано, что с увеличением внешнего осевого магнитного поля B_z период и амплитуда автоколебаний уменьшаются. Также установлено, что при $B_z \approx 7 \times 10^{-5}$ Тл вторичный вихрь не формируется и автоколебания отсутствуют, а при МП $B_z \gtrsim 5 \times 10^{-3}$ Тл вторичный вихрь вытесняет первичный к периферии, вследствие чего автоколебания прекращаются. С помощью волоконно-оптического датчика скорости исследовано время образования восходящего вихря в зависимости от величины внешнего МП. Показано, что время образования вторичного вихря уменьшается с ростом значения внешнего МП (соответствует положению 2).

Методом численного моделирования получена граница раздела зон одно-вихревого и двухвихревого течения для электрических токов 1–1000 А ($B_z = 10^{-5}$ – 1.4×10^{-4} Тл, $S = 10^3$ – 10^9 , $N = 788$ – 1.1×10^7), выявлено, что при электрических токах порядка 100–200 А, МП Земли приводит к образованию вторичного вихря. Таким образом, показано, что причиной образования вторичного вихря может быть как МП Земли, так и МП искусственного происхождения (созданное соленоидом).

Разработана методика расчета ЭВТ в БИ приближении и решения полной МГД задачи. Выявлено, что при внешнем МП 1.25×10^{-3} Тл ($S = 10^5$, $St = 7.1 \times 10^{-3}$, $N = 9.8 \times 10^5$) и более требуется выполнить численное моделирование, используя БИ приближение или решать полную МГД задачу, поскольку ЭД приближение дает сильно завышенные расчетные значения скорости (соответствует положению 3).

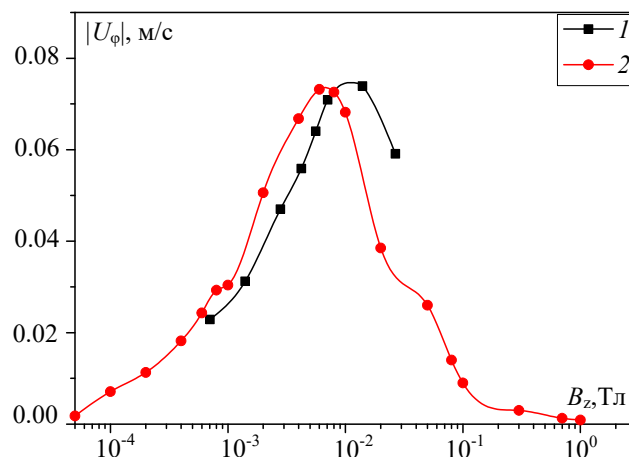


Рисунок 16 – Сравнение численных и экспериментальных данных для азимутальной скорости течения при $I = 100$ А, $r = 80$ мм. 1 – эксперимент, 2 – расчет.

Также показано, что для большинства промышленных и лабораторных задач достаточно использовать безындукционное приближение, поскольку необходимость решения полной МГД задачи возникает при $Re_m \approx 1$. Вместе с тем, для большинства металлургических и лабораторных установок магнитное число Рейнольдса, как правило, остается меньше единицы, что делает применение безындукционного приближения обоснованным.

Исследована структура и характеристики ЭВТ в широком диапазоне внешних МП от 5×10^{-5} до 1 Тл ($S = 10^7 - 10^9$, $N = 4 \times 10^5 - 7.8 \times 10^{10}$, $St = 4 \times 10^{-5} - 5 \times 10^4$). Выявлено, что при слабых МП, ниже границы перехода, зависящей от величины электрического тока, имеет место одновихревая структура течения, при достижении этой границы формируется двухвихревая структура течения. В диапазоне внешних МП от $\sim 10^{-4}$ Тл до $\sim 10^{-3}$ Тл течение имеет двухвихревую структуру, при этом возможно образование небольших локальных вихрей. Также в этом диапазоне внешних МП наблюдается минимум полной кинетической энергии, и, следовательно, слабая интенсивность течения. При дальнейшем увеличении МП вплоть до $\sim 10^{-2}$ Тл интенсивность течения возрастает, в связи с увеличением азимутальной скорости течения. При этом вторичный вихрь оттесняет первичный на периферию контейнера с жидким металлом.

Внешнее МП $B_z \approx 10^{-2}$ Тл ($St \approx 0.067$, $N \approx 7.8 \times 10^7$) соответствует максимуму полной кинетической энергии течения. При дальнейшем возрастании МП начинается электромагнитное торможение течения (соответствует положению 4). При этом восходящий вихрь радиально сжимается, а в остальном объеме формируется застойная зона с минимальной интенсивностью течения.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ивочкин, Ю. П. Экспериментальное и численное исследование автоколебаний в электровихревом течении жидкого металла / Ю. П. Ивочкин, И. О. Тепляков, Д. А. Виноградов // Тепловые процессы в технике. – 2015. – №12. – С. 539–545.
2. Ивочкин, Ю. П. Численный расчет магнитного поля с использованием технологии CUDA применительно к моделированию электровихревых течений / Ю. П. Ивочкин, Д. А. Виноградов, И. О. Тепляков // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2015. – № 2. – С. 13–18.
3. Ivochkin, Yu. Investigation of self-oscillations in electrovortex flow of liquid metal / Yu. Ivochkin, I. Teplyakov, D. Vinogradov // Magnetohydrodynamics. – 2016. – Vol. 52. – P. 277–286.
4. Vinogradov, D. Investigation of the Taylor vortices in electrovortex flow / D. Vinogradov, Yu. Ivochkin, I. Teplyakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 012059.
5. Vinogradov, D. Influence of the external magnetic field on hydrodynamic structure of the electrovortex flow in hemispherical container / D. Vinogradov, I. Teplyakov, Yu. Ivochkin, I. Klementyeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 899. – P. 082006.
6. Ивочкин, Ю. П. О различных магнитогидродинамических приближениях при моделировании электровихревых течений / Ю. П. Ивочкин, И. О. Тепляков, Д. А. Виноградов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2019. – Т. 7. – С. 18–23.
7. Vinogradov, D. On the applicability of the electrodynamic approximation in the simulation of the electrovortex flow in the presence of an external magnetic field / D. Vinogradov,

- I. Teplyakov, Yu. Ivochkin, A. Kharicha // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1128. – P. 012112.
8. Teplyakov, I. Experimental and numerical investigation of the instability of the electrovortex flow in hemispherical container / I. Teplyakov, D. Vinogradov, Yu. Ivochkin, I. Klementyeva // Fluid Dyn. Res. – 2018. – Vol. 50. – P. 051415.
9. Vinogradov, D. Numerical simulation of the electrovortex flow in the non-inductive approximation under the influence of an external magnetic field / D. Vinogradov, I. Teplyakov, Yu. Ivochkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1359. – P. 012021.
10. Teplyakov, I. Applicability of the different MHD approximations in the simulation of the electrovortex flow / I. Teplyakov, D. Vinogradov, Yu. Ivochkin, A. Kharicha, P. Serbin // Magnetohydrodynamics. – 2018. – Vol. 54. – P. 403–416.
11. Vinogradov, D. Study of modes of electrovortex flow in a wide range of external magnetic field magnitudes / D. Vinogradov, I. Teplyakov, Yu. Ivochkin // Magnetohydrodynamics. – 2019. – Vol. 55. – P. 455–464.
12. Teplyakov, I. Experimental Study of the Velocity of the Electrovortex Flow of In–Ga–Sn in Hemispherical Geometry / I. Teplyakov, D. Vinogradov, Yu. Ivochkin // Metals–Basel. – 2021. – Vol. 11. – P. 1806.
13. Vinogradov, D. Calculation of the Magnetic Field of a Current–Carrying System / D. Vinogradov, I. Teplyakov, Yu. Ivochkin // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – P. 3623.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояревич, В. В. Электровихревые течения. / Под ред. Щербинина Э.В. / В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг, Е. И. Шилова, Э. В. Щербинин. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
2. Lundquist, S. Hydromagnetic viscous flow generated by a diverging electric current / S. Lundquist // Ark. Fys. – 1969. – Vol. 40. – P. 89–95.
3. Sozou, C. On some similarity solution in magnetohydrodynamics / C. Sozou // J. Plasma Phys. – 1971. – Vol. 6. – P. 331–341
4. Sozou, C. On fluid motions induced by electric current source / C. Sozou // J. Fluid Mech. – 1971. – Vol. 46. – P. 25–32.
5. Компан, Я. Ю. Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД–процессами / Я. Ю. Компан, Э. В. Щербинин. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
6. Zi, S. Electroslag Welding / S. Zi, X. Kuangdi // The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy / ed. by K. Xu. – Singapore: Springer, 2023.
7. Pavlovs, S. Electrovortex flow and melt homogenization in the industrial direct current electrical arc furnace / S. Pavlovs, A. Jakovics, A. Chudnovsky // Magnetohydrodynamics. – 2022. – Vol. 58. – P. 305–326.
8. Herrera-Ortega, M. Numerical simulation of electromagnetically driven flow and temperature distribution inside an electric arc furnace with two non-parallel electrodes / M. Herrera-Ortega, J. A. Ramos-Banderas, C. A. Hernández-Bocanegra, A. Beltran // Revista Mexicana de Fisica. – 2025. – Vol. 71, no. 1. – P. 010603.
9. Xia, Z. Numerical investigation about the effect of axial static magnetic field on improvement of metal pool profile during electroslag remelting process / Z. Xia, Z. Sun, M. Zhang et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2023. – Vol. 54. – P. 3101–3114.
10. Huang, X. A three-dimensional multiphysics coupled model of melting and rotation of the electrode during electroslag remelting process / X. Huang, Z. Liu, B. Li, F. Wang, C. Liu // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2024. – Vol. 55. – P. 667–681.
11. Herreman, W. Efficient mixing by swirling electrovortex flows in liquid metal batteries / W. Herreman, C. Nore, L. Cappanera, J.-L. Guermond // J. Fluid Mech. – 2021. – Vol. 915. – P. A17.

12. Abdi, M. Mapping electro-vortex flow patterns from tornado to inverted tornado in a hemispherical container / M. Abdi, E. Karimi-Sibaki, C. Sommitsch et al. // *Int. J. Thermofluids*. – 2024. – Vol. 23. – P. 100721.
13. Kolesnichenko, I. Spin-up of electro-vortex flows under external magnetic field / I. Kolesnichenko, S. Mandrykin // *Eur. Phys. J. Plus*. – 2022. – Vol. 137. – P. 988.
14. Филатова, Н. К. Научное обоснование оптимальных параметров промышленной технологии выплавки слитков гафния для атомной промышленности: дис. канд. техн. наук: 05.16.02 / Филатова Надежда Константиновна. – Москва, 2016. – 157 с.
15. Termaat, K. Fluid flow measurements inside the reactor vessel of the 50 MWe Dodewaard nuclear power plant by cross correlation of thermocouple signals / K. Termaat // *J. Phys. E: Sci. Instrum.* – 1970. – Vol. 3. – P. 589–593.
16. Belyaev, I. Temperature correlation velocimetry technique in liquid metals / I. Belyaev, N. Razuvanov, V. Sviridov, V. Zagorsky // *Flow Meas. Instrum.* – 2017. – Vol. 55. – P. 37–43.
17. Keadze, B. Analysis of the statistical error and optimization of correlation flow meters / B. Keadze // *At. Energy*. – 1984. – Vol. 56. – P. 13–18.
18. Beck, M. Correlation in instruments: cross correlation flowmeters / M. Beck // *J. Phys. E*. – 1981. – Vol. 14. – P. 7–19.
19. Zhilin, V. An experimental investigation of the velocity field in an axisymmetric electrovortical flow in a cylindrical container / V. Zhilin, Yu. Ivochkin, A. Oksman et al. // *Magnetohydrodynamics*. – 1986. – Vol. 22. – P. 323–328.
20. Zhilin, V. G. Diagnostics of liquid metal flows using fibre-optic velocity sensor / V. G. Zhilin, K. V. Zvyagin, Yu. P. Ivochkin, A. A. Oksman // In: J. Lielpeteris, R. Moreau (eds.) *Liquid Metal Magnetohydrodynamics*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1989. – P. 373–379.
21. Жилин, В. Г. Волоконно–оптические измерительные преобразователи скорости и давления / В. Г. Жилин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 112 с.