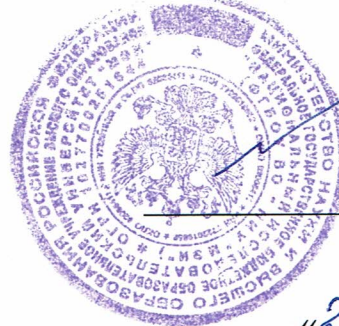


«УТВЕРЖДАЮ»



Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский
университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)
111250, г. Москва,
вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово,
ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1
Тел.: (495) 362-75-60, факс: (495) 362-89-38
E-mail: universe@mpei.ac.ru
https://mpei.ru

Проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО Национальный
исследовательский университет «МЭИ»
доктор технических наук



И.И. Комаров

«27» 09 2024 г.

№ 1277/520

«30» 09 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Колесниченко Ильи Владимировича «Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

1. Актуальность темы диссертационной работы

Исследования процессов гидродинамики и теплообмена при течениях жидких металлов в полях внешних электромагнитных и гравитационных сил актуальны для многих современных промышленных и перспективных технологий:

- использование жидкого металла в качестве теплоносителя в ядерных реакторах на быстрых нейтронах;
- получение металлов и сплавов с заданными свойствами микроструктуры с помощью электромагнитного перемешивания расплава;
- создание эффективных электромагнитных насосов для перекачки высокотемпературных жидких металлов;

- создание жидкометаллических батарей;
- использование жидкого металла для охлаждения blankets термоядерных реакторов и наработки трития;
- создание гибридных термоядерных реакторов – источников нейтронов и др.

В натуральных условиях детальные исследования процессов в жидких металлах как правило невозможны, поэтому особая роль отводится экспериментам на моделях в лабораторных условиях, максимально приближенных к реальным. С развитием компьютерных технологий эффективным инструментом исследования стало численное моделирование, позволяющее в ряде случаев получить достоверную и более подробную информацию о процессах.

Диссертация И.В. Колесниченко посвящена экспериментальному и численному исследованию изотермических и неизотермических вихревых течений жидкого металла при воздействии электромагнитных сил, влиянию указанных сил на теплоперенос, процессы кристаллизации, генерацию конвективного течения в каналах, а также новым методам диагностики течения и степени загрязнения жидкого металла.

Исследования носят не только фундаментальный характер, расширяя диапазон знаний о МГД процессах, но и представляют практический интерес для атомной энергетики и металлургии. Результаты, полученные в экспериментах с жидким натрием, обладают особой практической ценностью, т.к. могут использоваться не только для верификации компьютерных кодов, но и в более широком плане повышения безопасности атомных станций. Поэтому **актуальность темы** диссертации не вызывает сомнений.

2. Объем и структура диссертации

Диссертация содержит введение, пять глав и заключение, объем диссертации составляет 345 страниц с 232 рисунками и 3 таблицами, список литературы содержит 336 позиций.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, изложены вопросы достоверности и обоснованности полученных результатов работы. Также сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлены положения и результаты, вынесенные на защиту, указана апробация результатов диссертационной работы, личный вклад соискателя.

В первой главе экспериментально и численно исследуются крупномасштабные вихревые течения галлиевой эвтектики $Ga_{86.3}Zn_{10.8}Sn_{2.9}$ в цилиндрической ячейке при локализованном подводе электрического тока (катод изготовлен заподлицо с дном ячейки), а также с помощью катода в виде центрального стержня, пронизывающего ячейку по всей высоте. С этой целью автором создана экспериментальная установка, а также разработана математическая модель процессов, верифицированная с привлечением как

собственных экспериментальных данных, так и результатов, полученных другими авторами.

Отдельное методическое исследование выполнено для определения характеристик адаптера датчика ультразвукового доплеровского анемометра, обеспечивающих наилучшее качество измерений.

Численно и экспериментально установлено, что крупномасштабные вихревые течения электропроводящей жидкости в цилиндрической ячейке с локализованным катодом при превышении порогового значения параметра S , характеризующего отношение электромагнитных сил к силам вязкости, переходят в колебательный режим. Частота колебаний возрастает с ростом указанного параметра.

Показано, что изменением аспектного отношения ячейки можно регулировать интенсивность вихревого течения.

Исследовано влияние наложения внешнего аксиального магнитного поля на структуру течения.

Установлено отсутствие качественных изменений структуры течения в отсутствие внешнего магнитного поля при замене катода, локализованного на днище ячейки, на медный катод в виде центрального стержня. Численное исследование идеализированного случая цилиндрического катода с очень высокой электропроводностью показало, что в случае квазирадиального распределения электрического тока полоидальные течения не развиваются,

Показано, что магнитное поле кабелей электропитания приводит к появлению дополнительной компоненты силы Лоренца, и структура потока существенно изменяется. При этом ось азимутального потока отклоняется от вертикали. Обнаруженный автором эффект представляется чрезвычайно важным.

Численно обосновано применение раскрутки для использования в крупномасштабных системах хранения энергии с частыми циклами включения/выключения, например, в жидкометаллических батареях.

Вторая глава посвящена течениям жидкого металла в цилиндрических ячейках, вызванных действием бегущих (БМП) и вращающихся (ВМП) электромагнитных полей. Автором созданы экспериментальные установки и построена математическая модель процессов. Разработаны методики измерения интегральных характеристик силового воздействия, вызванного БМП и ВМП.

Показано, что одновременное использование бегущего и вращающегося магнитных полей генерирует течения с развитыми азимутальными и полоидальными компонентами. Применение бегущего магнитного поля приводит к усилению интенсивности полоидального течения расплавленного металла.

Исследования течений, которые создаются чередующимися по направлению вращающимися магнитными полями, показали, что данный режим генерации электромагнитных сил приводит к возникновению развитой интенсивной полоидальной компоненты течения.

Автором разработана новая конструкция индуктора, в котором возможно чередование направления вращающихся магнитных полей по высоте. Преимуществом новой конструкции индуктора, по сравнению с традиционными аппаратами подобного типа, является его компактность и модульность, что позволяет интегрировать индукторы в существующие производственные процессы и аппараты без необходимости их модернизации.

Разработана и применена методика определения достоверных участков турбулентного спектра, полученного кондукционным анемометром в условиях существенного влияния помех от источника электромагнитного поля.

Экспериментально получены турбулентные спектры течений жидкого металла в цилиндрической ячейке, вызванные бегущим и вращающимся магнитными полями с различными параметрами.

В **третьей** главе диссертации приводятся результаты экспериментального и численного исследования влияния течений жидких металлов и сплавов, вызванных действием переменного магнитного поля, на процесс их кристаллизации в плоских прямоугольных и цилиндрических ячейках. Автором разработана методика определения положения границы раздела фаз на основе анализа эхо сигнала, полученного датчиками ультразвукового доплеровского анемометра.

При изучении вихревых течений в плоских слоях с локальным переменным магнитным полем обнаружено, что они переходят в нестационарное состояние пороговым образом. Это проявляется в изменении вихревой структуры и перемещении вихрей по области слоя. Построены карты, на которых отображаются области, соответствующие разным вихревым структурам.

Исследовано действие бегущего магнитного поля на процесс кристаллизации в плоском слое. Получены зависимости формы межфазной поверхности и темпа кристаллизации от типа бегущего магнитного поля. Выявлен эффект сглаживания фронта затвердевания при модуляции бегущего магнитного поля.

Исследовано влияние течения жидкого металла в цилиндрических ячейках, вызванного действием бегущего и вращающегося магнитных полей, на процесс направленной кристаллизации и форму фронта затвердевания.

Экспериментально изучено влияние вихревых течений, создаваемых в ходе процесса направленной кристаллизации, на структуру получающихся слитков. Разработана методика анализа и получены зависимости структурных свойств цилиндрических слитков от параметров бегущего и вращающегося магнитных полей.

Результаты исследований вихревых течений жидкого натрия и теплообмена в наклонных цилиндрических ячейках с различными аспектными отношениями представлены в **четвертой** главе диссертации.

Для экспериментального исследования эволюции крупномасштабной циркуляции натрия и конвективного теплообмена со стенками цилиндрической ячейки автором созданы экспериментальные установки с ячейками различной

относительной длины $L/D = 1,0; 5,0; 20,0$. Конструкция установок позволяла изменять угол наклона оси ячейки по отношению к вертикали.

Экспериментально изучен процесс конвективного турбулентного теплопереноса в цилиндрических ячейках с жидким натрием с разным аспектным соотношением.

Изучение процессов в короткой ячейке ($L/D = 1,0$) выполнялось с применением специальных теплообменников, которые обеспечивали однородные граничные условия на торцах конвективной ячейки. Численно исследовано течение в теплообменнике, созданное бегущим магнитным полем, и определены параметры, при которых достигается наибольшая однородность температуры.

Экспериментально исследован процесс эволюции крупномасштабной циркуляции жидкого натрия в цилиндрической ячейке с $L/D = 1,0$. Выяснена причина различия процессов теплообмена в короткой и длинной ячейках при разных углах наклона оси ячеек относительно вертикали. Показано, что ось крупномасштабной циркуляции в короткой ячейке при углах её наклона до 40 градусов испытывает осцилляции, которые существенно ослабевают при дальнейшем увеличении угла наклона.

Определена зависимость характеристик турбулентного конвективного теплопереноса в цилиндрических ячейках от угла наклона их оси относительно вертикали. Экспериментально обнаружено, что наибольшая интенсивность турбулентного теплообмена в цилиндрических ячейках с жидким металлом достигается при углах наклона, близких к 60 градусам.

В пятой главе численно и экспериментально изучены процессы течений жидкого металла в цилиндрических каналах и тройниковом соединении. Это потребовало создания ряда экспериментальных установок, разработки методики анализа данных, полученных тепловизором, совершенствование моделей для численного исследования.

Экспериментально и численно изучено взаимодействие неизотермического турбулентного течения натрия в круглой трубе при воздействии локализованного поперечного магнитного поля. Показано, что «магнитное препятствие» порождает вихревые структуры, вызывающие значительные пульсации скорости и температуры, распространяющиеся вниз по течению на значительные расстояния.

Получен набор характеристик процесса генерации транзитного течения в коаксиальных каналах, которое создается с помощью индуктора бегущего магнитного поля. На основе полученных данных выбраны характеристики, обеспечивающие наибольший расход и перепад давления.

Обнаружено, что наличие экстремума на зависимости перепада давления от частоты тока, питающего обмотки электромагнитного насоса бегущего поля, позволяет определить электропроводность среды, что легло в основу разработанной методики контроля степени чистоты натрия.

На основе результатов разработаны и изготовлены расходомеры, которые

измеряют скорость на основе корреляционного анализа пульсаций, а также электромагнитные насосы для исследовательских стендов и атомных станций с жидкометаллическим теплоносителем.

На двухконтурном гидродинамическом стенде изучен процесс смешения в тройниковом соединении турбулентных потоков натрия с разной температурой. Показано, что поле температуры в стенке магистральной трубы вблизи врезки боковой трубы существенно нестационарно. При этом колебания температуры не являются периодическими. Изучение нерегулярных пульсаций и определение оценки их характерной частоты выполнено с помощью вейвлет-анализа, что позволило оценить интервал частот пульсаций. Полученные результаты представляются чрезвычайно важными по двум причинам. Во-первых, они позволяют оценить циклические термонапряжения в стенках труб и, следовательно, надежность соединения. Во-вторых, полученные экспериментальные данные остро необходимы для валидации математических моделей.

В заключении содержатся основные выводы по работе.

Текст диссертации является завершенным и оформлен на качественном уровне и в хорошем стиле. Выводы по работе структурированы и оформлены содержательно, что отражает результативность проведенных исследований. Основные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях. Автореферат диссертации соответствует основным идеям и выводам по работе.

3. Новизна полученных результатов исследования состоит в следующем:

1. Впервые на основе результатов подробных численных и экспериментальных исследований объяснены причины потери интенсивности крупномасштабного полоидального течения в цилиндрической ячейке во внешнем магнитном поле, а также экспериментально получены характеристики этого течения.
2. Впервые показаны возможность определения с помощью кросс-корреляционного вейвлет-анализа достоверной части турбулентных спектров течений, созданных бегущими или вращающимися магнитными полями, а также возможность создания развитого в объеме ячейки течения с помощью чередования направления вращающегося поля по высоте.
3. Впервые экспериментально показано, что использование совокупности бегущего и вращающегося магнитных полей существенно улучшает однородность свойств цилиндрических слитков, а управление характеристиками полей позволяет влиять на форму и скорость фронта затвердевания.
4. Впервые обнаружено наличие интенсивных колебаний крупномасштабной конвективной циркуляции в коротком канале при углах наклона его оси относительно вертикали вплоть до 40 градусов.
5. Впервые экспериментально получены зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена в цилиндрических каналах с

различными аспектными отношениями от угла их наклона относительно вертикали и осевого перепада температуры.

6. Впервые определены характеристики пульсаций течения, возникающих при обтекании локального магнитного «препятствия» в цилиндрическом канале.

7. Впервые предложена методика контроля электропроводности среды на основе поиска экстремума на характеристиках электромагнитного индуктора бегущего поля.

8. Впервые получены экспериментальные данные о частоте пульсаций температуры стенки магистральной трубы в окрестности тройникового смесителя потоков натрия, имеющих разную температуру.

4. Теоретическая и практическая значимость работы

1. **Общая теоретическая значимость** результатов работы заключается в проведении систематических теоретических и экспериментальных исследований и получении на их основе новых знаний об эволюции крупномасштабных вихревых течений жидкого металла в различных по топологии внешних магнитных полях, а также о влиянии этих течений на процессы кристаллизации, теплопереноса и генерации перепада давления.

2. Значимость в плане методов и подходов состоит в разработке и создании комплексных верифицированных математических моделей, экспериментальных установок и методик диагностики течений для изучения указанных процессов, что создает задел для проведения дальнейших исследований.

3. Результаты исследования вихревых течений, их взаимодействия, устойчивости, турбулентности вносят существенный вклад в теорию магнитогидродинамических течений, а разработанные экспериментальные методы и подходы расширяют существующие возможности физического эксперимента.

4. Результаты экспериментального исследования конвективного теплообмена в жидком натрии с помощью разработанных экспериментальных методик существенно дополняют теорию теплофизических процессов в средах с низким числом Прандтля.

5. Выполненные исследования развивают теорию магнитогидродинамического воздействия на расплавленные металлы и сплавы, и ее приложения к процессам перемешивания, кристаллизации, генерации и контроля транзитных потоков.

Общая практическая значимость результатов работы состоит в совершенствовании существующих технологий и создании заделов для перехода к технологиям следующего поколения в энергетической и металлургической промышленности.

1. На основе результатов, полученных при изучении математических моделей и физических экспериментов, разработаны и созданы новые высокотемпературные электромагнитные насосы, перемешиватели, расходомеры со 2-3-м уровнем готовности технологии для предприятий металлургии и атомной промышленности.

2. Жидкометаллический натриевый стенд используется для проведения приемосдаточных испытаний аппаратов для атомных станций.
3. Результаты исследования электровихревых течений во внешних магнитных полях необходимо учитывать при разработке и конструировании жидкометаллических батарей, дуговых печей, аппаратов дуговой сварки.
4. Результаты изучения конвективного теплообмена в цилиндрических ячейках с различными аспектными отношениями и теплообмена при смешении в тройниковом соединении потоков жидкого натрия с разными температурами необходимы для верификации расчетных кодов при конструировании новых ядерных реакторов с жидкометаллическими теплоносителями.

5. Обоснованность и достоверность результатов исследований

Численные исследования и обработка результатов расчетов и экспериментов выполнялись с помощью коммерческих многократно проверенных научным сообществом пакетов программ («Ansys», «Matlab»). В большинстве работ выполнена верификация математических моделей путем сравнения результатов расчетов и экспериментов.

В экспериментах использована измерительная аппаратура, произведенная фирмами, имеющими высокую репутацию в мировом научном сообществе, при этом методики тестировались в специальных экспериментах, а результаты измерений воспроизводились в однотипных реализациях.

Следует отметить, что в каждом разделе диссертации достоверности полученных результатов уделяется особое внимание. В качестве примеров можно привести специальное методическое исследование, выполненное автором для определения влияния электромагнитного поля силовых кабелей установки на картину течения жидкого металла в каверне (гл. 1), разработку и применение методики определения достоверных участков турбулентного спектра, полученного кондукционным анемометром (гл. 2), тщательную обработку поверхности труб тройникового соединения натриевого стенда для снижения погрешностей определения пульсаций температуры стенки при измерении тепловизором (гл. 5) и др.

Результаты численного моделирования валидируются с привлечением полученных автором данных экспериментальных данных.

6. Личный вклад автора в получении результатов диссертации.

В постановке задач в большинстве исследований вклад автора является определяющим, либо существенным.

Автор внес значительный вклад в разработку экспериментальных установок и методик экспериментов. Чертежи экспериментальных установок выполнены автором лично, а установки собраны и налажены при его активном участии.

Ряд экспериментов выполнен при непосредственном участии автора, часть экспериментов проведена под его руководством.

Многовариантные численные исследования были проведены автором самостоятельно. Автор разработал и создал большинство наиболее трудоемких программ обработки расчетных данных, а также результатов физических экспериментов, полученных ультразвуковыми доплеровскими анемометрами, кондукционными датчиками скорости, термопарами, тепловизором, микроскопом. Автором созданы программы и выполнен вейвлет-анализ пульсационных характеристик.

Автор активно участвовал в обобщении результатов и формировании выводов всех исследований, а также написании всех статей.

Значительный личный вклад автора отражен в публикациях по работе.

7. Апробация работы и публикации

Научные положения, выносимые на защиту, прошли масштабную апробацию на многих российских и международных научных конференциях и достаточно полно отражены в 85 печатных работах, из которых 30 публикаций – статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций, и реферативные базы «Scopus» или «Web of Science». Все опубликованные труды отражают содержание диссертации.

8. Замечания по диссертационной работе

1. Не ясно, как по данным, изображенным на рис. 1.21, можно определить пороговое значение параметра S .
2. Не вполне ясно, хватает ли концентрации оксидов в жидком металле для надежной диагностики с помощью УДА.
3. На с. 96 сообщается: «Для описания турбулентности в ряде исследований используется стандартная $k - \omega$ модель.... Наряду с $k - \omega$, использовалась модель Large Eddy Simulation (LES) в варианте Смагоринского». К сожалению, из текста диссертации не всегда удается выяснить, с помощью какой модели получены те или иные результаты.
4. Если электромагнитное поле подводющих кабелей (гл. 1) так сильно искажает картину течения, то как интерпретировать экспериментальные результаты, если они зависят от расположения кабелей и токов в них, а не только от плотности тока в ячейке и наложенных внешних полей?
5. В подписи к рис. 2.20 (а) указано, что изображено поле азимутальной компоненты скорости (хотя над рисунком можно различить надпись « V_p »), что вводит читателя в заблуждение, т.к. на самом деле изображено поле компоненты скорости V_y , которая в плоскости xOz по знаку отличается от азимутальной при $x < 0$.
6. На с.164 сообщается, что «пузырьки водорода... увлекали за собой движущийся металл, указывая тем самым траектории и скорость его движения». В это с трудом верится. Что является несущей фазой?

7. Означает ли серый фон на рис. 3.27 отличную от нуля пористость, т.е. размазанность фронта кристаллизации?

8. В гл. 5 на с. 271 утверждается, что несмотря на малость магнитного числа Рейнольдса, электродинамическое приближение нельзя использовать для численного исследования неизотермического обтекания магнитного препятствия. В выводах к гл. 5 сообщается, что «доработана математическая модель процессов в безындукционном приближении». Если рассматривается «безындукционное приближение», то с какой целью используется «разложение магнитного поля на стационарную составляющую и индуцированное поле $B = B_0 + b$ »? В чем заключается необходимость решать уравнение переноса для индукции? Какие граничные условия ставились для B ?

9. В уравнении сохранения импульса силы плавучести не учитываются при численном анализе течения натрия. Было бы полезно оценить числа Ричардсона.

10. Судя по расцветке полей, на рис. 5.11a изображено поле температуры, а не скорости. Поле скорости изображено на рис. 5.11b. Если расцветка поля соответствует модулю скорости (шкала расцветки отсутствует), то в сечении $Y0Z$ профиль продольной скорости имеет М-образный вид. Заметные локальные максимумы на профиле скорости в слое Робертса появляются только при больших числах Гартмана. Какие числа Гартмана характерны для моделируемого режима?

11. Общее замечание к разделам с численным моделированием.

В разделах диссертации, содержащих результаты численного моделирования, полезно было бы привести: полную математическую постановку с исчерпывающим описанием граничных и начальных условий; расчетные области и характеристики используемых сеток для расчета гидродинамики; доказательства независимости полученных решений от используемой сетки. Не все условия и параметры режимов, детали численного моделирования, особенно важные при использовании метода LES, можно найти в тексте диссертации. В частности, в разделе 5.2.3. «Численное исследование неизотермического обтекания магнитного препятствия» для моделирования, вероятно, используется LES. Турбулентное течение моделируется в относительно короткой трубе $L = 14,7D$. Воздействие локального магнитного поля начинается при $L/D = 3,2$, т.е. в области начального гидродинамического участка (числа Рейнольдса изменялись от 3400 до 34000). Используемая численная сетка не обсуждается. Указывается, что на входе задается расход, о форме и возможных возмущениях профиля скорости на входе не сообщается. Что представляет собой профиль скорости в сечении начала воздействия магнитного поля при различных числах Рейнольдса и в какой степени он соответствует турбулентному течению не ясно. Течение на выходе из трубы - нестабилизированное, это можно видеть на рис. 5.11. Какие условия задаются для искомым переменных на выходе?

Большинство замечаний носит рекомендательный характер и может быть учтено автором в последующей научной деятельности.

9. Заключение по работе

Диссертационная работа И.В. Колесниченко является законченной научно-квалификационной работой, имеющей внутреннее единство и свидетельствующей об определяющем личном вкладе автора в решение поставленных задач. Полученные автором результаты соответствуют заявленным целям исследования.

Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований, полно и точно отражает содержание диссертационной работы.

Фундаментальный характер результатов работы заключается в проведении систематических теоретических и экспериментальных исследований и получении на их основе новых знаний об эволюции крупномасштабных вихревых течений жидкого металла в различных по топологии внешних магнитных полях.

Автором решена крупная научная проблема, имеющая важное значение для совершенствования существующих и развития перспективных технологий в энергетике и металлургии при создании принципиально новых или более эффективных устройств и средств измерений, таких как: создание жидкометаллических накопителей энергии, высокотемпературных электромагнитных насосов, перемешивателей, расходомеров, устройств для бесконтактного определения чистоты высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей ядерных установок на быстрых нейтронах.

Учитывая изложенное, диссертационная работа И.В. Колесниченко оценивается, безусловно, положительно.

Результаты изучения конвективного теплообмена в каналах, замкнутых объемах, тройниковых соединениях при турбулентных течениях жидкого натрия необходимы для верификации отечественных CFD кодов «Логос» (РФЯЦ-ВНИИЭФ), «FlowFision» (компания «ТЕСИС»), «ANES» (НИУ «МЭИ»), которые могут использоваться для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в АО «ОКБМ Африкантов» и АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежаля, ИБРАЭ РАН, НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» и других предприятиях Госкорпорации «РОСАТОМ».

Результаты изучения воздействия вращающимися и бегущими магнитными полями на процесс перемешивания и кристаллизации могут применяться при разработке электромагнитных перемешивателей для алюминиевого производства в АО «РУСАЛ Красноярский алюминиевый завод» и ПАО «РУСАЛ Братск».

Результаты исследования электровихревых течений во внешних магнитных полях могут быть полезны для совершенствования процесса вакуумно-дугового переплава, используемого на производстве титана ПАО Корпорация ВСМПО-АВИСМА.

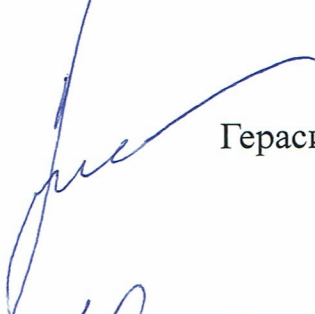
Результаты, полученные при изучении процессов обтекания магнитного препятствия и генерации транзитного течения бегущими магнитными полями, могут быть использованы для разработки электромагнитных аппаратов для

генерации и контроля транзитного течения жидкометаллического теплоносителя, которые ведутся в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова, АО «ОКБМ Африкантов». Применение таких аппаратов возможно в реакторе МБИР АО «ГНЦ НИИАР» и в реакторах типа БН Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова.

Диссертационная работа Колесниченко Ильи Владимировича «Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений» по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности и обоснованности научных положений и выводов соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор - Колесниченко Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Результаты диссертационной работы и настоящий отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании кафедры инженерной теплофизики НИУ «МЭИ». Протокол № 09/2024 от 11 сентября 2024 г.

Заведующий кафедрой
инженерной теплофизики, к.ф.-м.н.
(e-mail: GerasimovDN@mpei.ru)


Герасимов Денис Николаевич

Профессор кафедры
инженерной теплофизики, д.т.н.
e-mail: YankovGG@mpei.ru)


Яньков Георгий Глебович

Подпись к.ф.-м.н., зав. каф. инженерной теплофизики Герасимова Дениса Николаевича и д.т.н., профессора Янькова Георгия Глебовича заверяю

Зам. начальника управления
по работе с персоналом


Полевая Людмила Ивановна

