

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 18.10.2024 № 138

О присуждении Колесниченко Илье Владимировичу, гражданину России, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений» по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 15.07.2024, протокол № 131, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Колесниченко Илья Владимирович 1977 года рождения, в 2000 году с отличием окончил магистратуру Пермского государственного технического университета по направлению «Прикладная математика и механика». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «**МГД-процессы в плоских слоях проводящей жидкости с электрическим током**» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» Колесниченко И.В. защитил 19 мая 2005 г. в диссертационном совете Д 004.012.01 в Институте механики сплошных сред УрО РАН. Диплом кандидата наук ДКН № 028749 выдан 16 сентября 2005 г. В настоящее время Колесниченко И.В. работает **заведующим** лабораторией технологической гидродинамики Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН. Диссертация выполнена в Пермском федеральном исследовательский центре УрО РАН.

**Официальные оппоненты:**

1. Ивочкин Юрий Петрович, доктор технических наук (01.04.14), главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теплообмена в энергетических установках ФГБУН "Объединенный институт высоких температур Российской академии наук", г. Москва;
  2. Исаев Сергей Александрович, доктор физико-математических наук (01.02.05), профессор, заведующий лабораторией фундаментальных исследований ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова", г. Санкт-Петербург;
  3. Кривилев Михаил Дмитриевич, д.ф.-м.н. (05.13.18), доцент, заведующий лабораторией физики конденсированных сред Института математики, информационных технологий и физики ФГБОУ ВО "Удмуртский государственный университет", г. Ижевск;
- дали положительные отзывы на диссертацию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет «МЭИ»" (НИУ МЭИ), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанном Герасимовым Д.Н., к.ф.-м.н., заведующим кафедрой инженерной теплофизики; Яньковым Г.Г., д.т.н., профессором кафедры инженерной теплофизики, и утвержденном проректором по науке и инновациям НИУ МЭИ, д.т.н. Ковалевым И.И., указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, имеющей внутреннее единство и свидетельствующей об определяющем личном вкладе автора в решение поставленных задач. 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: жидкометаллические накопители энергии, высокотемпературные электромагнитные насосы, перемешиватели, расходомеры, устройства для бесконтактного определения чистоты высокотемпературных жидкометаллических теплоносителей ядерных установок на быстрых нейтронах. Представленная диссертационная работа «Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Колесниченко Илья Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

**Соискателем опубликовано** 30 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Kolesnichenko I.**, Frick P., Eltishchev V., Mandrykin S., Stefani F. Evolution of a strong electrovortex flow in a closed cell // Physical Review Fluid. 2020. Vol. 5, № 12. Art. id. № 123703.

*В работе численно и экспериментально изучен процесс развития электровихревого течения и его пульсационные характеристики.*

2. Frick P., Mandrykin S., Eltischev V., **Kolesnichenko I.** Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 949. Art. id. № A-20.

*В работе численно и экспериментально изучено электровихревое течение при различных силовых параметрах во внешнем магнитном поле.*

3. **Kolesnichenko I.**, Mandrykin S. Spin-up of electro-vortex flows under external magnetic field // The European Physical Journal Plus. 2022. Vol. 137. Art. id. № 988.

*В работе численно изучен процесс развития электровихревого течения при различных видах силового воздействия, а также в добавочном внешнем поле.*

4. Mandrykin S., Ozernykh V., **Kolesnichenko I.** Electro-vortex flow of liquid metal in a cylindrical cell with localized current supply and variable aspect ratio // Magnetohydrodynamics. 2020. Vol. 56, № 2/3. P. 215-224.

*В работе численно изучаются характеристики интенсивности и колебания электровихревого течения для ячеек, имеющих разное отношение высоты к диаметру.*

5. Eltishchev V., Mandrykin S., **Kolesnichenko I.** The influence of a cylindrical cathode on the electro-vortex flow of liquid metal: Numerical simulations and laboratory experiments // Europhysics Letters. 2022. Vol. 137. Art. id. № 13001.

*В работе численно и экспериментально изучено течение, формирующееся в конфигурации с внешним полем и токоподводом, пронизывающее ячейку.*

6. Losev G., **Kolesnichenko I.** The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // Flow Measurement and Instrumentation. 2020. Vol. 75. Art. id. № 101786.

*Представлены результаты экспериментального исследования влияния адаптера ультразвукового доплеровского анемометра (УДА) на качество профиля скорости.*

7. Denisov S., Dolgikh V., **Kolesnichenko I.**, Khalilov R., Khripchenko S., Verhille G., Plihon N., Pinton J.F. Flow of liquid metal in a cylindrical crystallizer generating two-directional MHD stirring // Magnetohydrodynamics. 2010. Vol. 46, № 1. P. 69-78.

*В работе экспериментально исследуется поле скорости и турбулентные характеристики течения, вызванного действием бегущего и вращающегося полей.*

8. **Kolesnichenko I.**, Pavlinov A., Golbraikh E., Frick P., Kapusta A., Mikhailovich B. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields // Experiments in Fluids. 2015. Vol. 56. Art. id. № 88.

*Разработана и применена методика оценки достоверного участка спектра на основе вейвлет кросс-корреляционного анализа и получены спектры турбулентности.*

9. **Kolesnichenko I.**, Khalilov R., Khripchenko S., Pavlinov A. MHD stirrer for cylindrical molds of continuous casting machines fabricated aluminium alloy // Magnetohydrodynamics. 2012. Vol. 48, № 1. P. 221-233.

*В работе численно и экспериментально исследуется зависимости магнитных полей, момента электромагнитных сил, скорости и ее пульсационных характеристик.*

10. **Колесниченко И.**, Мамыкин А., Халилов Р. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: верификация электромагнитной части задачи // Вестник Пермского университета. Физика. 2022. № 4. С. 45-51.

*В работе получены зависимости магнитного поля и электромагнитной силы от параметров вращающегося магнитного поля.*

11. Халилов Р., Мамыкин А., Окатьев Р., **Колесниченко И.** Влияние течения, вызванного действием вращающихся магнитных полей, на процессы в расплавленной электропроводной среде // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2023. № 3. P. 6-16.

*В работе представлены результаты исследования воздействия вращающихся магнитных полей на жидкий металл, имеющих разные направления вращения.*

12. Озерных В., Лосев Г., Голбрайх Е., **Колесниченко И.** Начальная стадия формирования вихревого течения в индукторе с вращающимися встречно магнитными полями // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. Vol. 16, № 4. P. 493-503.

*Представлены результаты исследования начальной стадии формирования течения, созданного вращающимися магнитными полями с разными направлениями вращения.*

13. Losev G., **Kolesnichenko I.** Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal // Magnetohydrodynamics . 2019. Vol. 55, № 1-2. P. 97-106.

*В работе экспериментально изучено вихревое течение в плоском слое жидкого металла, вызванное действием локализованного переменного магнитного поля.*

14. Oborin P., **Kolesnichenko I.** Application of the ultrasonic doppler velocimeter to study the flow and solidification processes in an electrically conducting fluid // Magnetohydrodynamics . 2013. Vol. 49, № 1-2. P. 231-236.

*В работе экспериментально изучено воздействие вихревого течения в плоском слое жидкого металла на процесс кристаллизации с помощью УДА.*

15. Shvydkiy E., Sokolov I., **Kolesnichenko I.**, Losev G. The influence of liquid-solid interface position and shape on the electromagnetic forcing parameter during horizontal solidification // Metallurgical and Materials Transactions B. 2021. V. 52, № 4. P. 1997-2007.

*В работе изучено влияние процесса кристаллизации и изменения распределения электропроводности на электромагнитные силы в плоском слое жидкого металла.*

16. **Kolesnichenko I.**, Pavlinov A., Khalilov R. Movement of the solid-liquid interface in gallium alloy under the action of rotating magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2013. Vol. 49, № 1-2. P. 191-197.

*В работе с помощью УДА экспериментально изучено влияние вращающегося магнитного поля на кристаллизацию галлиевой эвтектики в цилиндрической ячейке.*

17. Losev G., **Kolesnichenko I.** Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2019. Vol. 528. Art. id. № 125249.

*В работе с помощью УДА экспериментально изучено влияние действия бегущего поля и его варьирования на фронт кристаллизации в слое галлиевой эвтектики.*

18. Denisov S., Dolgikh V., Khripchenko S., **Kolesnichenko I.**, Nikulin L. The effect of travelling and rotating magnetic fields on the structure of aluminum alloy during its crystallization in a cylindrical crucible // Magnetohydrodynamics. 2014. Vol. 4, № 4. P. 249-265.

*В работе представлены результаты численного и экспериментального исследования влияния бегущего и вращающегося магнитных полей на процесс кристаллизации и свойства структуры слитков алюминиевых сплавов.*

19. Khalilov R., **Kolesnichenko I.**, Pavlinov A., Mamykin A., Shestakov A., Frick P. Thermal convection of liquid sodium in a short inclined cylinder // Physical Review Fluids. 2018. Vol. 3. Art. id. № 043503.

*В работе экспериментально изучены характеристики колебательного режима крупномасштабной циркуляции конвективного течения жидкого натрия.*

20. Zwirner L., Khalilov R., **Kolesnichenko I.**, Mamykin A., Pavlinov A., Mandrykin S., Shestakov A., Teimurazov A., Frick P., Shishkina O. The influence of the inclination angle on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 884. Art. id. № A18-1-37.

*Представлены экспериментально полученные характеристики теплообмена жидкого натрия в короткой наклонной цилиндрической ячейке (длина равна диаметру).*

21. Frick P., Khalilov R., **Kolesnichenko I.**, Mamykin A., Pakholkov V., Pavlinov A., Rogozhkin S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // Europhysics Letters. 2015. Vol. 109. Art. id. № 14002.

*Представлены результаты исследования турбулентного теплообмена при конвективном течении жидкого натрия в длинной наклонной цилиндрической ячейке.*

22. Васильев А.Ю., **Колесниченко И.В.**, Мамыкин А.Д., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Рогожкин С.А., Пахолков В.В. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 9. С. 45-49.

*В работе экспериментально получены характеристики течения и теплообмена в длинной наклонной цилиндрической ячейке (длина в двадцать раз больше диаметра).*

23. **Колесниченко И.В.**, Мамыкин А.Д., Павлинов А.М., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Шепелев С.Ф. Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре // Теплоэнергетика. 2015. № 6. С. 31-39.

*В работе представлены результаты исследования турбулентных характеристик конвективного течения жидкого натрия в длинной цилиндрической ячейке ( $L=5D$ ).*

24. **Kolesnichenko I.**, Khalilov R., Teimurazov A., Frick P. On boundary conditions in liquid sodium convective experiments // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 891. Art. id. № 012075.

*В работе описано численное и экспериментальное исследование процессов в камерах теплообменников с жидким натрием.*

25. **Kolesnichenko I.**, Khalilov R., Shestakov A., Frick P. ICMM's two-loop liquid sodium facility // Magnetohydrodynamics . 2016. Vol. 52, № 1. P. 87-94.

*В работе описаны исследования, выполненные в рамках разработки двухтемпературного исследовательского натриевого стенда.*

26. **Колесниченко И.**, Халилов Р., Шестаков А., Крылов А., Пахолков В., Павлинов А., Мамыкин А., Васильев А., Рогожкин С., Фрик П. Перемешивание разнотемпературных потоков жидкого натрия в трубопроводе за тройником // Теплоэнергетика. 2023. № 3. С. 49-57.

*В работе с помощью тепловизора экспериментально исследован процесс смешения разнотемпературных потоков жидкого натрия в тройниковом соединении.*

27. **Kolesnichenko I.**, Mamykin A., Golbraikh E., Pavlinov A. Application of temperature correlation method to measuring the flow rate of liquid sodium // Magnetohydrodynamics . 2021. Vol. 57, № 4. P. 547-557.

*В работе численно и экспериментально изучен процесс обтекания магнитного препятствия. Показан анализ пульсаций температуры в следе за препятствием.*

28. Мамыкин А., Халилов Р., Голбрайх Е., **Колесниченко И.** Применение магнитного препятствия для генерации пульсаций при расходомерии жидкометаллического теплоносителя на принципе температурных корреляций // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2023. № 3. P. 17-28.

*В работе изучено влияние размера области воздействия магнитного поля при обтекании магнитного препятствия на формирование пульсаций.*

29. Khalilov R., **Kolesnichenko I.** Annular linear induction pump for liquid sodium // Magnetohydrodynamics . 2015. Vol. 51, № 1. P. 95-103.

*В работе численно и экспериментально изучено влияние геометрических и физических параметров на интенсивность генерации перепада давления.*

30. **Колесниченко И.**, Халилов Р. Экстремум зависимости напора электромагнитного насоса для жидкого металла от частоты питающего тока // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15, № 4. С. 495-506.

*В работе численно и экспериментально изучены зависимости перепада давления, на которых присутствует экстремум, от частоты тока в обмотках индуктора.*

Публикации содержат в сумме 320 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы:** от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Ивочкина Ю.П. В отзыве отмечено, что диссертация представляет собой оригинальную и завершенную научно-квалификационную работу, посвященную изучению генерации и взаимодействию крупномасштабных вихревых структур, образующихся в объемах жидких металлов в условиях воздействия электромагнитных полей и сил плавучести. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение, имеющее существенное значение в области механики жидкости, газа и плазмы. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации:

- замечание о существовавшем ранее предположении о подавлении полоидального течения тороидальным вихрем;
- вопрос о погрешности и измерительном объеме кондукционного анемометра;
- вопрос о достаточности концентрации окислов для измерения УДА;
- об отсутствии графического материала по сопоставлению с другими авторами;
- о применимости электродинамического приближения при поле более 0.01 Тл;
- замечание о редакторских недоработках.

2. Положительный отзыв официального оппонента Исаева С.А. В отзыве отмечено, что диссертация является законченным научным исследованием, представляющим крупный вклад в актуальный раздел механики жидкости и газа. Оппонент задает следующие вопросы по диссертации:

- вопрос об обосновании выбора модели турбулентности, сетках, воздействии полей;
- вопрос о причине больших доверительных интервалов на графиках скорости УДА;
- вопрос о близости результатов для свободной и твердой верхних границ;
- вопрос о причинах вариации частоты пульсации вихря в вертикальном положении;
- вопрос о числе элементов электродинамической и гидродинамической сеток.

3. Положительный отзыв официального оппонента Кривилева М.Д. В отзыве отмечено, что в диссертации приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение серии актуальных научных задач, имеющих существенное значение для развития подходов и методов магнитной гидродинамики. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание о чувствительности вейвлет-спектра к длине выборки;
- замечание о квазилинейности зависимости эволюции положения границы фаз;
- замечание об избыточности анализа размеров фрагментов твердого раствора.

4. Положительный отзыв ведущей организации НИУ МЭИ. В отзыве отмечается, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, имеющей внутреннее единство и свидетельствующей об определяющем личном вкладе автора в решение поставленных задач. 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. Результаты могут использоваться для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями и для разработки электромагнитных аппаратов для генерации и контроля транзитного течения жидкометаллического теплоносителя.

Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- вопрос об определении порогового значения параметра  $S$ , выше которого в течении возникают пульсации скорости;
- вопрос о концентрации оксидов в жидком металле для измерения УДА;
- вопрос о том, где использовалась  $k$ - $\omega$  модель турбулентности, а где LES;
- вопрос о влиянии поля подводящих кабелей и интерпретации результатов опытов;
- вопрос о подписи к рисунку: изображена азимутальная или  $V_u$  компонента скорости;
- вопрос о том, что является несущей фазой для пузырьков водорода;
- вопрос о том, означает ли серый фон размазанность фронта кристаллизации;
- вопрос о необходимости решения уравнения переноса для индукции и граничных условий;
- замечание об оценке числа Ричардсона и необходимости учета сил плавучести;
- замечание о соответствии рисунков подписям и значении числа Гартмана;
- замечание о необходимости привести полную матпостановку, параметры сеток, сеточную сходимость, указания граничных условий на выходе из канала с потоком.

**На автореферат поступило 8 отзывов:**

1. Положительный отзыв от Беляева И.А., к.т.н., заместителя директора по научной работе ФГБУН "Объединенный институт высоких температур РАН", г. Москва (3 замечания);
2. Положительный отзыв от Демина В.А., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой теоретической физики ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Ингеля Л.Х., д.ф.-м.н., доцента, ведущего научного сотрудника Института экспериментальной метеорологии ФГБУ НПО «Тайфун» (Росгидромет), г. Обнинск (1 замечание);
4. Положительный отзыв от Михайлова Е.А., д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника ФГБУН "Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН", г. Москва (2 замечания);
5. Положительный отзыв от Перминова А.В., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой общей физики ФГАОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет", г. Пермь (4 замечания);
6. Положительный отзыв от Разуванова Н.Г., д.т.н., заведующего лабораторией кафедры инженерной теплофизики ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет «МЭИ»", г. Москва (2 замечания);
7. Положительный отзыв от Сарапулова Ф.Н., д.т.н., профессора кафедры электротехники; Смольянова И.А., к.т.н., доцента кафедры электротехники ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет им. Б.Н.Ельцина", г. Екатеринбург (8 замечаний);
8. Положительный отзыв от Хацаюка М.Ю., д.т.н., доцента, директора по науке ООО НПЦ «Магнитной гидродинамики», г. Красноярск (3 замечания).

### **В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:**

- об определении свойств используемой галлиевой эвтектики;
- о датчиках-турбинах для измерения скорости;
- об интенсивности пульсаций температуры и размерности шкалы энергии пульсаций;
- о решении проблем сопряженных тепловых процессов в рассматриваемых системах;
- о возможных противоречиях в полном соответствии названия темы и заключения,
- небольших редакторских недоработках;
- о значении проводимости катода, имеющего высокую электропроводность;
- о эволюции границы раздела фаз для разных величин воздействующих полей;
- о конкретизации целевых свойств турбулентности и затвердевшего металла;
- об неоднозначности отношения автора к своим математическим моделям;
- о пояснении термина «растекание электрического тока»;
- о преимуществах вейвлет-анализа по сравнению с традиционным Фурье-анализом;
- о погрешностях опытных методик измерения локальной скорости;
- о формулировке единого магнитогидродинамического подхода;
- о физическом механизме появления завихренности электромагнитных сил;
- об определении порога неустойчивости и модели турбулентности при его поиске;
- об электродинамическом и безындукционном приближениях и их ограничениях;
- о возможном появлении неустойчивости Кельвина-Гельмгольца;
- о понятии пристеночная турбулентность и способах управления ею;
- об исследовании и учете насыщения ферромагнетиков в расчетах;
- об алгоритме поиска границы кристаллизации с помощью УДА;
- о влиянии полей перемешивателя на процессы в конвективной ячейке.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области магнитной гидродинамики, теплофизики в жидких металлах, вычислительной гидродинамики, кристаллизации при воздействии электромагнитных сил, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований процессов в обычных жидкостях и жидких металлах; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет «МЭИ»" (г. Москва) является одним из ведущих научных центров в области исследования магнитогидродинамических процессов в условиях неоднородного нагрева каналов, в университете активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по следующим научным направлениям: инженерная теплофизика, магнитная гидродинамика, процессы в энергетических реакторах. Отзыв ведущей организации,



содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании научного семинара кафедры инженерной теплофизики в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** новый подход к созданию развитых вихревых течений, открывающий широкие возможности для бесконтактного управления процессами в жидких металлах и сплавах;

**предложены** оригинальные подходы и методы исследований, позволившие описать динамику электровихревых течений под действием внешнего магнитного поля и нестационарный характер конвективной крупномасштабной циркуляции жидкого металла в наклонном цилиндре;

**доказана** определяющая роль дифференциального вращения в формировании структуры течения жидкого металла с локализованным подводом электрического тока, а также доминирующее влияние крупномасштабной циркуляции на конвективный теплообмен жидкого металла в наклонном цилиндре;

**введены** критерии и параметры для описания физических механизмов создания полоидальных вихревых течений в замкнутых цилиндрических ячейках и каналах с транзитными потоками.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказано** влияние развитого многомасштабного вихревого течения на характеристики процессов теплообмена, перемешивания, кристаллизации; продемонстрировано количественное согласие результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):**

**использованы** современные методы измерений скорости в жидких металлах (ультразвуковой доплеровский анемометр) и температуры (тепловизор), пакеты вычислительной электродинамики и гидродинамики на основе методов конечных элементов и конечных объёмов, специализированное программное обеспечение для автоматизации измерений и сбора данных; оригинальные экспериментальные установки, разработанные автором;

**изложены** физические механизмы, объясняющие: потерю интенсивности полоидального электровихревого течения под действием внешнего магнитного поля; отличия между процессами теплообмена в коротких и длинных ячейках, повышение степени корреляции температурных пульсаций при обтекании магнитного препятствия;

**изучены:** структура и динамика течений жидкого металла в условиях действия электромагнитных сил и турбулентной конвекции Рэлея-Бенара, процессы кристаллизации и теплопереноса в условиях действия вихревых течений, неизотермические пульсации потоков жидкого металла;

**проведена модернизация** экспериментального комплекса для работы с жидким натрием, позволившая разработать и создать экспериментальные установки и реализовать исследования процессов теплообмена, генерации и измерения транзитных потоков.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны** расчётные коды, с помощью которых возможно проводить создание электромагнитных аппаратов для энергетики и металлургии;

**внедрены** на Белоярской атомной электростанции разработанные с применением этих кодов электромагнитные насосы с улучшенными технологическими характеристиками для жидкометаллического натриевого теплоносителя;

**определены** области значений внешнего магнитного поля, при которых электровихревые течения существенно теряют интенсивность, что необходимо учитывать при разработке и конструировании жидкометаллических батарей, дуговых печей, аппаратов дуговой сварки.

**созданы** методики повышения эффективности генерации течений с помощью бегущих и вращающихся магнитных полей для повышения однородности температуры и состава жидкого металла, что повышает качество кристаллической структуры затвердевающих слитков;

**представлены** характеристики процессов теплообмена в жидком натрии при тепловой конвекции и смешении разнотемпературных потоков. Результаты использованы при верификации математических моделей и вычислительных пакетов, которые применяются для разработки атомных реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ применялось** аттестованное оборудование и современные экспериментальные методы исследования, что позволило обеспечить воспроизводимость и высокую точность полученных результатов;

**теория** построена на основе анализа полученных в работе данных и согласуется с представленными в диссертации результатами математического моделирования и экспериментов;

**идея базируется** на обобщении результатов исследований магнитогидродинамических и конвективных течений в различных условиях, результатах тестовых вычислений и экспериментов;

**установлено** качественное и количественное соответствие полученных данных известным результатам математического моделирования и экспериментальных исследований в пересекающихся областях параметров;

**использованы** апробированные экспериментальные методики измерения скорости течений и их температуры, а также современные методы цифровой обработки и статистического анализа данных.

**Личный вклад соискателя состоит в** постановке задач, планировании исследований, интерпретации результатов и участии в создании и модернизации экспериментальных установок, проведении опытов, численных расчетов и обработке полученных результатов.


**Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.**

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержатся результаты, вносящие существенный вклад в развитие знаний в области магнитной гидродинамики и теплопереноса, и имеющие фундаментальное значение для понимания процессов генерации и эволюции вихревых течений и их влияния на процессы теплопереноса, кристаллизации, генерации и контроля транзитных потоков.

На заседании 18 октября 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Колесниченко И.В. ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.т.н., профессор, академик РАН  
Матвеев Валерий Павлович

 / Матвеев В.П.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 004.036.01  
д.ф.-м.н., доцент  
Зуев Андрей Леонидович

 / Зуев А.Л.

21 октября 2024 г.

М.П.