

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 КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 11.11.2021 № 81

О присуждении Мандрыкину Сергею Дмитриевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести» по специальности 1.1.9 (01.02.05) «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 09.09.2021, протокол № 75, 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** Мандрыкин Сергей Дмитриевич 1993 г. рождения, в 2017 г. окончил ФГБОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по направлению «Физика». В 2021 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) по научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории технологической гидродинамики ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в ИМСС УрО РАН – филиале ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук".

**Научный руководитель** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физической гидродинамики ИМСС УрО РАН Фрик Петр Готлобович.

**Официальные оппоненты:**

1. Соколов Дмитрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук (01.04.02), профессор, профессор кафедры математики физического факультета ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова" (г. Москва);
2. Перминов Анатолий Викторович, доктор физико-математических наук (01.02.05), доцент, профессор кафедры общей физики ФГАОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (г. Пермь);

дали положительные отзывы на диссертацию

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (СПбПУ), г. Санкт-Петербург, в своем положительном заключении, составленном к.ф.-м.н., заведующим научно-исследовательской лабораторией гидроаэродинамики Физико-механического института (ФизМех) Н.Г. Ивановым; д.ф.-м.н., главным научным сотрудником научно-

исследовательской лаборатории гидроаэродинамики ФизМех Е.М. Смирновым и утвержденном и.о. проректора по научно-организационной деятельности СПбПУ, д.т.н., доцентом Ю.С. Клочковым, указала, что диссертация представляет собой обстоятельное научное исследование актуальных задач современной гидродинамики и содержит ряд существенных новых научных результатов, имеющих важное практическое значение. Работа прошла широкую апробацию на конференциях и семинарах, а ее основные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Представленная диссертационная работа «Течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Мандрыкин Сергей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – Механика жидкости, газа и плазмы.

**Соискателем опубликовано** 6 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Мандрыкин С.Д.**, Теймуразов А.С. Турбулентная конвекция жидкого натрия в наклонном цилиндре с единичным аспектным отношением // Вычислительная механика сплошных сред. 2018. Т. 11, № 4. С. 417-428.

*В работе численно изучена турбулентная термогравитационная конвекция жидкого натрия в наклонном цилиндре единичного аспектного отношения..*

2. Zwirner L., Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., **Mandrykin S.**, Pavlinov A., Shestakov A., Teimurazov A., Frick P., Shishkina O. The influence of the cell inclination on the heat transport and large-scale circulation in liquid metal convection // Journal of Fluid Mechanics. 2019. V. 884. (Published online).

*Описаны результаты исследования конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре, полученные численно методом прямого численного моделирования и с применением метода крупных вихрей, а также результаты экспериментального исследования.*

3. **Mandrykin S.**, Kolesnichenko I., Frick P. Electro-vortex flows generated by electrodes localized on the cylinder side wall // Magnetohydrodynamics. 2019. V. 55, № 1-2. P. 115-124.

*В работе экспериментально изучено электровихревое течение жидкого галлиевого сплава в цилиндре с боковым оппозитным подводом тока двумя электродами, в том числе в присутствии внешнего магнитного поля.*

4. **Mandrykin S.**, Ozernykh V., Kolesnichenko I. Numerical study of electrovortex flow in long cylinder with localized current supply // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 581. P. 012009.

*Представлены результаты численного исследования течения галлиевого сплава в вытянутом цилиндре с боковым оппозитным подводом тока двумя электродами.*

5. **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. V. 56, № 2–3. P. 81-90.

*Изучено электровихревое течение жидкого металла в цилиндрах с различными аспектными отношениями, в случае осесимметричного расположения электродов.*

6. Kolesnichenko I., Frick P., Eltishchev V., **Mandrykin S.**, Stefani F. Evolution of a strong

electrovortex flow in a cylindrical cell // Phys. Rev. Fluids. 2020. V. 5. P. 123703.

*В работе исследовано подавление полоидального электровихревого течения жидкого металла внешним вертикальным магнитным полем.*

Публикации содержат в сумме 85 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 Соколова Д.Д. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, научная и практическая значимость полученных результатов; обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- не стоит писать с большой буквы слова типа рисунок или заключение, если они, конечно, не стоят в начале фразы;
- пожелание автору дополнить свое очень сдержанное описание важности изучаемых эффектов более расширительными фразами, которые поясняют важность полученных выводов.

2. Положительный отзыв официального оппонента Перминова А.В. В отзыве отмечено, что диссертация посвящена актуальным проблемам, связанным с влиянием на конвективные и электровихревые течения жидких металлов в замкнутых емкостях осложняющих факторов, таких как геометрические особенности емкости, ее ориентация в пространстве, расположение электродов, внешние силовые поля. Оппонент отмечает следующие замечания:

- в разделе 4 обзора литературы делается обзор численных методов решения гидродинамических задач. К сожалению, отсутствуют ссылки на работы Тарунина Евгения Леонидовича, представителя Пермской гидродинамической школы, сделавшего немало для развития метода конечных разностей применительно к задачам гидродинамики;
- при описании математической постановки задач приводятся только уравнения движения и теплопроводности в общем виде, а уравнения моделей турбулентности не приводятся совсем. Наряду с базовыми уравнениями тепловой конвекции, их необходимо было привести и обсудить;
- замечание о том, что на странице 45 в главе 1 сказано, что для проверки сходимости численного решения сравнивались числа Нуссельта и Рейнольдса для различных сеток, однако сравнительный анализ не выполнен. Неясно, на основании каких соображений для расчетов выбрана сетка 2.9 млн узлов. В главах 2–4 также отсутствует анализ сходимости результатов расчетов с изменением количества узлов сетки и четко не представлены критерии выбора размерности сетки;
- не приведено существенной аргументации в пользу предположения о том, что можно пренебречь нагревом металла в результате протекания через него токов;
- работа не лишена грамматических, орфографических и стилистических ошибок. В ней достаточно много несогласованных фраз и оборотов, которые можно отнести к профессиональному сленгу, не всегда понятному стороннему читателю.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области исследования течений жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость – результаты могут быть использованы в российских образовательных и научных организациях, проводящих исследования в области экспериментального и численного моделирования течений электропроводной жидкости (МЭИ, СПбПУ, ОИВТ РАН, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, НИИЭФА и др.).

Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- введенный в главе 1 термин «полное число Рейнольдса» неудачен. Для обобщения данных вполне достаточно введенного автором «крупномасштабного» числа Рейнольдса, построенного по характерной скорости среднего движения и характерному размеру полости. «Мелкомасштабное» число Рейнольдса, оценивается по характерной скорости «фонового» пульсационного движения и глобальному линейному масштабу. Представляется, что более последовательным было бы использование непосредственно отношения двух вычисленных средних по объему скоростей: это отношение наглядно характеризовало бы общую интенсивность «фоновой» турбулентности;
- представленные в главе 2 результаты численного моделирования получены при помощи полуэмпирической модели турбулентности, однако определяющие уравнения магнитной гидродинамики представлены только в общем виде. Отсутствует информация об использованной схеме для расчета конвективных потоков;
- в главе 2 при описании численной модели информация о том, что в использованной модели внешнее магнитное поле катушек Гельмгольца считается постоянным и однородным приводится некстати;
- замечание о том, что отсутствие списка обозначений несколько затрудняет проработку материала диссертации.

**На автореферат поступило 5 отзывов:**

1. Положительный отзыв от Ивочкина Ю.П., д.т.н., главного научного сотрудника, заведующего лабораторией теплообмена в энергетических установках ФГБУН "Объединенный институт высоких температур РАН", г. Москва (2 замечания);
2. Положительный отзыв от Листратова Я.И., к.т.н., доцента, доцента кафедры инженерной теплофизики ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет «МЭИ»", г. Москва (3 замечания);
3. Положительный отзыв от Макарова Д.В., к.ф.-м.н., заведующего кафедрой физики фазовых переходов ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь (без замечаний);
4. Положительный отзыв от Разуванова Н.Г., д.т.н, ведущего научного сотрудника лаборатории теплофизических проблем ядерной и термоядерной энергетики ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет «МЭИ»", г. Москва (3 замечания);
5. Положительный отзыв от Фризена В.Э., д.т.н., доцента, заведующего кафедрой электротехники ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.Ельцина", г. Екатеринбург (2 замечания).

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

- из содержания автореферата неясно, какое магнитогидродинамическое приближение использовалось в численных расчетах для описания электровихревых течений;
- нет пояснений к некоторым обозначениям, представленным на рисунке 2;
- из текста работы не вполне ясно, почему в качестве емкости автором выбран цилиндр единичного аспектного отношения или почему выбрана конфигурация с боковым токоподводом;
- большая часть результатов в автореферате, за исключением, пожалуй, главы 1, представлена в размерном виде, поэтому не вполне понятно каким образом ими воспользоваться при анализе реальных конструкций;
- вопрос о том, почему эффективный теплоперенос при горизонтальном расположении цилиндра выше, чем при вертикальном, и это при том, что числа Рейнольдса, определяющие как интенсивность среднего движения, так и пульсационного выше как раз в случае вертикального расположения;
- замечание о необходимости пояснить процедуру построения сетки для новой численной модели: процедура сравнения с результатами, полученными другим методом, должна производиться каждый раз, или же есть более общие рекомендации по настройке сетки;
- неясно, почему в экспериментальной установке, описанной в разделе 2.2 диссертации, выбрано именно такое взаимное расположение электродов и катушек Гельмгольца, ведь в такой конфигурации величина электродинамических сил будет минимальна;
- в автореферате не приведены основные дифференциальные уравнения с необходимыми допущениями, решаемые в пакете, начальные и граничные условия;
- замечание о том, что в первой главе не представлено описание экспериментальной части и неясно, что и как измерялось;
- в автореферате ничего не сказано о состоянии вопроса об имеющихся исследованиях других авторов по расчету электровихревых течений в условиях внешних магнитных полей.

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 оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

**официальные оппоненты** являются одними из ведущих специалистов в области физики, физической и магнитной гидродинамики, имеют большое число публикации с результатами теоретических и численных исследований; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

**ведущая организация** Физико-механический институт (ФизМех) ФГАОУ ВО СПбПУ является одним из ведущих научных центров в области механики, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области методов вычислений и контроля точности аппроксимаций для краевых задач различных типов;

численное моделирование сложных турбулентных течений, включая применение новых вихреразрешающих моделей; решение задач гидродинамики и теплообмена в атомной и термоядерной энергетике. Научно-исследовательская работа сотрудников института опирается на передовые достижения мировой науки и длительный опыт международного сотрудничества. Крупные направления исследований реализуются в рамках учебно-научных лабораторий и научно-образовательных центров.

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 научно-исследовательской лаборатории гидроаэродинамики Физико-механического института в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

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

**разработаны** методика лабораторного эксперимента и численные модели, позволившие исследовать зависимости характеристик течений жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести от осложняющих факторов;

**предложены** оригинальные численные модели и схема эксперимента, позволившие обнаружить и описать новые закономерности динамики крупномасштабных структур в течениях жидких металлов;

**доказана** необходимость детального анализа переходных электровихревых течений, возникающих при включении тока в жидкометаллических батареях;

**введена** важная для описания эволюции электровихревых течений во внешних магнитных полях характеристика – текущее отношение энергии азимутального течения к энергии полоидального и показано, что при приближении этой величины к единице начинается глобальная перестройка структуры течения.

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

**доказано** существование высокого уровня пульсаций температуры при малых наклонах полости в случае свободной конвекции жидкого натрия;

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

**использованы** современные методы экспериментальных исследований течений жидких металлов и пакеты для решения численных задач;

**изложены** физические соображения, объясняющие процесс подавления электровихревого течения слабым внешним магнитным полем;

**раскрыты** особенности пространственно-временной структуры крупномасштабной циркуляции при тепловой конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре; особенности ЭВТ жидких металлов при несогласованных топологии вихрей и геометрии емкости, различных аспектных отношениях, а также переходные режимы ЭВТ в присутствии внешнего однородного магнитного поля;

**изучены** зависимости структуры и пространственно-временной динамики течений, возникающих при тепловой конвекции или электровихревых течениях жидких металлов, от внешних осложняющих факторов;

**проведена модернизация** экспериментальной установки и численных моделей для решения задач магнитной гидродинамики.

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

**разработана и внедрена** методика регистрации ультразвуковым анемометром тороидальных структур в жидком металле при боковом токоподводе к цилиндру;

**определены** зависимости интегральных характеристик течений от внешних параметров – угла наклона конвективной ячейки, направления и величины внешнего (слабого) магнитного поля. Результаты могут быть использованы при разработке технологических устройств, в которых используются жидкометаллические теплоносители, и могут быть востребованы в металлургии и энергетике, в частности, при проектировании жидкометаллических батарей;

**создана** обширная база данных интегральных характеристик течений жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести от различных осложняющих факторов;

**представлены** рекомендации по проектированию современных и перспективных энергетических устройств и раскрыты перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** исследования проведены с применением современных оборудования и методов, что позволило обеспечить высокую точность и воспроизводимость результатов;

**теория** построена на основе анализа полученных в работе экспериментальных и численных данных и согласуется с приведенными в литературе результатами по теме диссертации;

**идея базируется** на обобщении результатов исследований тепловой конвекции и электровихревых течений жидких металлов при наличии осложняющих факторов, в том числе выполненных автором;

**использовано** сравнение полученных в диссертации результатов с известными экспериментальными и численными данными для верификации численных моделей;

**установлено** качественное и количественное согласие полученных данных с известными результатами теоретических и экспериментальных исследований для различных значений управляющих параметров;

**использованы** современные экспериментальные методики измерения скорости течения жидкого металла, а также современные методы численного решения задач магнитной гидродинамики, методы цифровой обработки и анализа данных.

**Личный вклад соискателя состоит** в участии в постановке задач, обсуждавшихся с научным руководителем Фриком П.Г. и Колесниченко И.В. Подготовка и выполнение расчетов в первой главе осуществлялись совместно с Теймуразовым А.С. Расчеты электродинамических задач и проектирование экспериментальной установки выполнены Колесниченко И.В. Автор лично участвовал в подготовке, сборке и наладке экспериментальной установки. Расчеты гидродинамических задач во второй, третьей и четвертой главах выполнены автором совместно с Колесниченко И.В. Автор лично участвовал в обработке и обсуждении результатов и подготовке всех статей.

**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 содержится решение задачи о влиянии осложняющих факторов на течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести.

На заседании 11 ноября 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Мандрыкину С.Д. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человека, из них 8 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 – 15, против – 0, не проголосовало – 0.

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

 / Матвеевко В.П.

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

 / Зуев А.Л.

12 ноября 2021 г.

