ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 14 октября 2026 г. (протокол № 9)

Защита диссертации Виноградова Дмитрия Андреевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
«Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля»
Специальность 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Москва – 2026

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета 24.1.193.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).
Протокол № 9 от 14 октября 2026 г.

Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 25 человек, из них 12 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 10 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) д.ф.-м.н. профессор, академик РАН Петров Олег Федорович

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01(Д 002.110.02) к.ф.-м.н. Тимофеев Алексей Владимирович

1.	Петров О.Ф.	д.ф.-м.н. профессор, академик РАН	1.3.9, техн. науки	Присутствует
2.	Андреев Н.Е.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
3.	Храпак А.Г.	д.ф.-м.н. профессор	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
4.	Тимофеев А.В.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
5.	Агранат М.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
6.	Амиров Р.Х.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
7.	Апфельбаум Е.М.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
8.	Беляев И.А.	к.т.н.	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
9.	Вараксин. А.Ю.	д.ф.-м.н. профессор, академик РАН	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
10.	Васильев М.М.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
11.	Васильем М.Н.	д.т.н., профессор	1.3.14, техн. науки	Подключен
12.	Василяк Л.М.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, техн. науки	Присутствует
13.	Гавриков А.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Отсутствует
14.	Голуб В.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14, техн. науки	Присутствует
15.	Грязнов В.К.	д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14, физ.-мат.науки	Подключен
16.	Дьячков Л.Г.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует

17.	Еремин А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
18.	Зеленер Б.Б.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
19.	Зобнин А.В.	д.ф.-м.н.	1.3.9, техн. науки	Присутствует
20.	Иосилевский И.Л.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
21.	Киверин А.Д.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
22.	Лагарьков А.Н.	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН	1.3.9, физ.-мат.науки	Отсутствует
23.	Левашов П.Р.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.14, физ.-мат.науки	Присутствует
24.	Ломоносов И.В.	чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. профессор	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
25.	Норман Г.Э.	д.ф.-м.н. профессор	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
26.	Пикуз С.А.	к.ф.-м.н.	1.3.9, физ.-мат.науки	Подключен
27.	Савватимский А.И.	д.т.н	1.3.14, техн. науки	Отсутствует
28.	Стегайлов В.В.	д.ф.-м.н., доцент	1.3.9, техн. науки	Подключен
29.	Трухачев Ф.М.	д.ф.-м.н.	1.3.14, техн. науки	Присутствует
30.	Филиппов А.В.	д.ф.-м.н., профессор	1.3.9, физ.-мат.науки	Присутствует
31.	Яньков Г.Г.	д.т.н., с.н.с.	1.3.14, физ.-мат.науки	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации научного сотрудника лаборатории 10.2 – теплообмена в энергетических установках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) Виноградова Дмитрия Андреевича на тему «Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Диссертация выполнена в лаборатории 10.2 – теплообмена в энергетических установках ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Научный руководитель:

Тепляков Игорь Олегович – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории 10.2 – теплообмена в энергетических установках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Официальные оппоненты:

Соколов Дмитрий Дмитриевич - гражданин РФ, д.ф.-м.н., профессор кафедры математики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ имени М.В.Ломоносова; Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1).

Ячиков Игорь Михайлович – гражданин РФ, д.т.н., профессор кафедры «Информационно-измерительная техника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ЮУрГУ (НИУ); Россия, 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (ПФИЦ УрО РАН; Россия, 614000, г. Пермь, ул. Ленина, 13а).

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н. Соколов Д.Д. и д.т.н. Ячиков И.М., научный руководитель Виноградова Д.А. к.т.н. Тепляков И.О.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Уважаемые коллеги, у нас в повестке дня защита диссертации Виноградова Дмитрия Андреевича на тему «Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля». Диссертация представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника. Слово ученому секретарю.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Хорошо, есть ли вопросы к ученому секретарю? Если нет, тогда мы переходим к следующему пункту. Предоставляется слово Дмитрию Андреевичу Виноградову для изложения основных положений диссертации. Пожалуйста.

Виноградов Д.А.

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Виноградова Д.А. имеется в деле).

Председатель

Перейдем к обсуждению представленных результатов. Кто хотел бы задать вопрос? Пожалуйста, Леонид Михайлович.

Василяк Л.М.

Вы исследовали в основном ртуть, а в промышленности в основном плавят алюминий. У алюминия плотность существенно намного меньше. Что Вы можете сказать об электровихревых течениях в алюминии? И можно ли использовать результаты для натрия, который тоже более легкий и у него другая электропроводность в отношении алюминия?

Виноградов Д.А.

Алюминий жидкий при достаточно высокой температуре, около 600, по-моему, плюс-минус, градусов. При этом у него электропроводность относительно хорошая, когда он твердый, а когда он жидкий, у него электропроводность даже хуже, чем у In-Ga-Sn. Это будет примерно похоже на режим 1. Получится, что электромагнитное торможение при таких токах будет при достаточно больших полях, потому что электропроводность относительно мала по сравнению с In-Ga-Sn либо даже натрием.

Председатель

Еще вопросы, пожалуйста, Федор Михайлович.

Трухачев Ф.М.

Можно посмотреть слайд? Первое защищаемое положение вы показали, а перед ним слайд был. Вот тут влияние магнитного поля Земли, а не указано, на какой широте.

Виноградов Д.А.

На широте Москвы, да.

Трухачев Ф.М.

Мне казалось, неужели не будет зависеть? Это хорошая поправка была бы. Вот вы использовали сплав из каких-то экологических соображений, ртуть, мне кажется, дешевле была бы и не было бы химии никакой?

Виноградов Д.А.

In-Ga-Sn использовался, потому что он нетоксичный и относительно безопасный и имеет комнатную температуру плавления.

Трухачев Ф.М.

И еще вопрос. Если у нас три сплава, они никак не будут разделяться? Будет проблема с этим?

Виноградов Д.А.

Я, возможно, неправильно выразился. Нет, они не будут разделяться, это эвтектический сплав.

Председатель

Есть ли еще вопросы? Пожалуйста, Анатолий Васильевич.

Филиппов А.В.

В магнитном поле проводимость приобретает тензорный характер, у вас данный характер не проявлялся?

Виноградов Д.А.

В данном случае мы это не учитывали. У нас проводимость одна.

Председатель

Ответ: не учитывали.

Пожалуйста, Иван Александрович.

Беляев И.А.

В продолжение вопроса о влиянии магнитного поля Земли. Помимо того, что оно отличается на широте. Вы эксперименты проводили на экспериментальной установке, магнитное поле Земли может достаточно сильно отличаться от усредненных значений. Вы проводили детальное измерение магнитного поля Земли в окрестности экспериментальной установки?

Виноградов Д.А.

Мы брали данные ИЗМИРАН, и при компенсации магнитного поля мы измеряли осевую компоненту магнитометром. Магнитометр показывал примерно 5×10^{-5} Тл, когда магнитное поле Земли присутствовало, и 3×10^{-6} Тл, когда магнитное поле компенсировали катушкой Максвелла.

Беляев И.А.

То есть измерения проводили?

Виноградов Д.А.

Да, магнитометром мы измеряли магнитное поле рядом с поверхностью жидкого металла.

Беляев И.А.

Вы сказали, что численная методика может учитывать индуцированные магнитные поля, они в итоге учитывались у Вас в расчете?

Виноградов Д.А.

Только эти расчеты, представленные на одном слайде, которые представлены, это были тестовые расчеты, скорее для того, чтобы понять, следует ли вообще решать полную магнитогидродинамическую задачу и учитывать индуцированные магнитные поля, и тратить вычислительные ресурсы.

Беляев И.А.

Вы учитывали их внешним образом, когда индуцированные магнитные поля могут замыкаться вне области жидкого металла?

Виноградов Д.А.

Это не было учтено. Магнитные поля рассчитывались по закону Био-Савара-Лапласа только в объеме жидкого металла. Так что да, это ограничение численной методики.

Беляев И.А.

Еще один вопрос. У вас третье положение. О малости магнитного поля. Этот вывод справедлив только для геометрии вашего полусферического контейнера. Правильно?

Виноградов Д.А.

Для других, например, для цилиндрической геометрии, я думаю, что результат будет похожим, но сдвинется граница.

Беляев И.А.

Мой вопрос скорее касается геометрического размера. Можно ли применять эту оценку, если я возьму объем в два раза больше, то критерий, который вы вывели в положении, он сместится или останется неизменным?

Виноградов Д.А.

Тут важно, что это должен быть тот же жидкий металл. По крайней мере, для величины магнитного поля. Если геометрию увеличить...

Беляев И.А.

Да, примерно раза в два.

Виноградов Д.А.

Скорее всего, если изменить геометрию, но отношение электродов оставить такое же, то будет примерно такое же магнитное поле.

Беляев И.А.

Вы защищаете положение только для Вашей геометрии?

Виноградов Д.А.

Да, для данной геометрии. Скорее, ценность этого положения в том, что раньше считалось, что приближение перестаёт работать только при токах порядка 30 кА. А здесь получилось, что уже при $S = 10^5$, что соответствует току 10 А, и относительно небольшом внешнем магнитном поле приближение не работает.

Председатель

Еще вопрос, пожалуйста. Павел Ремирович.

Левашов П.Р.

Первый вопрос. У вас в первом и четвёртом положении говорится о торможении скорости при движении жидкости в магнитном поле. Но в четвёртом положении это называется электромагнитное торможение, а в первом так оно не называется.

Виноградов Д.А.

Вы имеете в виду *слайд 27*?

Левашов П.Р.

Да.

Виноградов Д.А.

Да, это тоже электромагнитное торможение на самом деле.

Левашов П.Р.

На самом деле это один и тот же механизм.

Виноградов Д.А.

Да, это один и тот же механизм.

Левашов П.Р.

Второй вопрос. Безындукционное приближение по сравнению с полной МГД-задачей. Какой выигрыш дает по времени или в процентах?

Виноградов Д.А.

Я думаю, что достаточно большой, потому что, чтобы решать полную задачу, можно двумя вариантами ее посчитать. Во-первых, например, законом Био-Савара-Лапласа, тогда не нужно задавать дополнительный объем. Либо дифференциальным уравнением, но тогда обычно возникают проблемы с граничными условиями и рекомендуют строить достаточно большой объем, чтобы поставить нулевые граничные условия.

Левашов П.Р.

Вы так сказать не можете, цифрой?

Виноградов Д.А.

Я бы сказал, что в несколько раз точно.

Председатель

Еще вопросы есть, пожалуйста?

Тогда мы переходим к следующему пункту. Слово предоставляется научному руководителю, кандидату технических наук Теплякову Игорю Олеговичу. Пожалуйста, Игорь Олегович.

Тепляков И.О.

Добрый день. Дмитрий Андреевич с нами со студенческих лет, работает в нашей лаборатории очень давно, выступал на разных конференциях, регулярно получал различные премии, несколько раз занимал первые, вторые и третьи места на конференциях. Что касается этой работы, наверное, самое главное, что мы постарались найти какие-то новые вещи и обратить на них внимание.

Например, что касается влияния магнитного поля Земли: этим мы начали заниматься давно, но новое знание не сразу становится общепризнанным. До сих пор не все верят, что магнитное поле Земли, вроде бы слабое, может на что-то влиять. А по факту мы сейчас уже столкнулись с тем, что просто провести эксперимент без компенсации магнитного поля… Магнитное поле Земли постоянно мешает, если знать о том, что оно влияет. А система компенсации, она соответственно эту задачу решает.

Часть, которая связана с магнитной гидродинамикой…

Председатель

Игорь Олегович, нам не надо, чтобы вы работу рассказывали. Это прерогатива Дмитрия Андреевича. Поэтому больше о нем самом.

Тепляков И.О.

Как говорят, что степень кандидата наук говорит о том, что человек может проводить самостоятельные научные исследования. Но Дмитрий Андреевич давно уже может проводить самостоятельные научные исследования, успешно их проводит. Поэтому я прошу поддержать эту работу.

Председатель

Спасибо. Вопросов нет к научному руководителю?

Тогда слово Алексею Владимировичу, пожалуйста.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, в деле имеется заключение организации, где выполнялась диссертация, это Объединенный институт высоких температур. Если позволите, в заключении и последующих отзывах, про которые я буду рассказывать, не буду зачитывать полностью, где подробно описывается диссертация, новизна, достоверность, значимость, ценность научных результатов. Потому что мы только что послушали диссертацию. А буду переходить к содержательной части и к замечаниям.

В заключении организации, где выполнялась диссертация, сделан следующий вывод. Диссертация «Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля» Виноградова Дмитрия Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Кроме того, в деле есть отзыв ведущей организации. Ведущей организацией выступил Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук. Отзыв подготовил заведующий лабораторией технологической гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук доктор физико-математических наук Колесниченко Илья Владимирович.

Кроме того, указано, что отзыв рассмотрен и одобрен на заседании научного семинара под руководством доктора технических наук, академика РАН Матвиенко Валерия Павловича.

Соответствующие подписи есть, и отзыв заверен директором. Если позволите, опять же не буду зачитывать подробное рассмотрение диссертации, а перейду непосредственно к замечаниям и вопросам.

Первое замечание. Отсутствует учет температуры в математической постановке задачи. В модели предполагается, что физические свойства среды изотропны, однородны и не зависят от температуры. Однако в экспериментальной части прямо отмечается, что с увеличением электрического тока возрастает интенсивность температурных пульсаций вследствие тепловыделения в жидком металле и на малом электроде, а сама установка

снабжена системой охлаждения для ограничения нагрева расплава. Насколько допустимо полностью исключать термогравитационную конвекцию? Имеются ли колебания температуры у системы охлаждения? Каков характерный диапазон температуры жидкого металла для основных режимов и какова оценка изменения физических свойств среды в этом диапазоне? Достаточно ли 600 секунд для охлаждения среды между измерениями?

Второе замечание. Чем обосновывается использование осесимметричной постановки для исследования нестационарных вихревых режимов? Трехмерная проверка проведена лишь для ограниченного числа непредельных режимов. Насколько корректно численно описываются пристеночные и экмановские слои в использованной k–ω SST модели?

Третье замечание. Граничное условие на свободной поверхности в расчете меняется между режимами и само по себе может значительно влиять на структуру течения. Насколько выводы о границе применимости МГД-приближений зависят от граничных условий на верхней поверхности?

Четвертое замечание. Оценка влияния пульсаций электрического тока выглядит недостаточно доказательной. Реальный уровень пульсации тока составляет около 20% с частотой 300 Гц, хотя в расчетах ток считается постоянным. Диссертант ссылается на тестовые расчеты, показавшие отсутствие значительного влияния на гидродинамику, однако сами результаты этих тестов, величина отличия и используемый критерий "незначительности" не представлены. При нелинейной электромагнитной силе, зависящей от тока и магнитного поля, амплитуда 20% не выглядит настолько малой, чтобы ее можно было исключить без явной количественной оценки. Необходимо внести ясность в этот вопрос.

Пятое замечание. Корреляционный метод имеет достаточно большую и режимно-зависимую погрешность. Диссертант получает типичную полную погрешность 6-15%, но отмечает, что в отдельных режимах она достигает 35%. При этом один из центральных экспериментальных выводов – уменьшение осевой скорости под воздействием магнитного поля Земли на 30–50%. В большинстве режимов эффект превышает типичную погрешность, однако при худшей погрешности порядка 35% нижняя граница эффекта уже становится сопоставимой с неопределенностью измерения. Поэтому необходимо привести доверительные интервалы для рисунка 4.3 и провести статистическую проверку значимости различий между режимами с компенсацией и без компенсации магнитного поля Земли.

Шестое замечание. В тексте недостаточно подробно раскрыта повторяемость экспериментов. Какова повторяемость результатов? Сколько серий экспериментов проводилось по изучению каждого из режимов?

Седьмое замечание. На какой глубине находился корреляционный зонд? В тексте указано z=20 мм (стр. 87), в то время как в подписи к рисунку 4.1 z=10 мм (стр. 88).

Восьмое замечание. Волоконно-оптический датчик имеет очень большую относительную погрешность при малых скоростях. При значениях U~0.01 м/с относительная инструментальная погрешность составляет 100–200%, при U=0.05 м/с – до 10%, и лишь при больших скоростях становится малой. При этом тарировочная зависимость волоконно-оптического преобразователя получена для скоростей более 0.1 м/с, судя по рисунку 2.16, а дискретизация скорости при тарировке была малой. Также тарировка волоконно-оптического преобразователя выполнена в воздушной струе, а затем пересчитана на жидкий металл, что потенциально может являться дополнительным источником систематической неопределенности. Необходимо внести ясность в этот вопрос.

Заключение. Отмеченные выше недостатки не снижают общей оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным в пункте 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Виноградов Дмитрий Андреевич заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Если позволите, последний пункт про соответствие критериям пункта 9 положения и о том, что соискатель заслуживает присуждения ученой степени, этот повторяющийся текст, в следующих отзывах я буду пропускать.

Кроме того, получены положительные отзывы на автореферат.

(Первый отзыв). Отзыв получен от заведующего кафедрой инженерной теплофизики НИУ МЭИ, доктора физико-математических наук, доцента Дениса Николаевича Герасимова. Отзыв положительный, обращусь к замечаниям.

Первое замечание. Каким физическим условиям соответствует численное моделирование течения с граничным условием в виде нулевой скорости на поверхности жидкости?

Второе замечание. Насколько переносимы результаты диссертации о структуре течения в исследуемой установке на другие условия, т.е. достаточно ли равенства указанных в работе безразмерных параметров (в частности, S и N) для выводов о формировании, например, автоколебательного режима? Не будут ли критичными симплексы для описания условий образования тех или иных пространственных структур и режимов?

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления о проделанной автором работе.

(Второй отзыв). Следующий отзыв получен от Митрофановой Ольги Викторовны, доктора технических наук, профессора кафедры теплофизики института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ. Отзыв положительный, есть замечания.

Первое замечание. Автор рассматривает среду с внутренним тепловыделением, при этом токи в установке достигают сотен ампер, но про роль свободной конвекции ничего не говорится.

Второе замечание. Автор рассматривает воздействие магнитного поля на турбулентное течение жидкого металла, но ничего не говорит об эффекте подавления турбулентности.

(Третий отзыв*, не оформлен должным образом).* Кроме того, был получен отзыв на автореферат от Сергея Захаровича Сапожникова, директора НОЦ «Теплофизика в энергетике», профессора высшей школы атомной тепловой энергетики Института энергетики СПбПУ, доктора технических наук, профессора. Отзыв положительный. Есть следующие замечания.

Первое замечание. В работе с существенной экспериментальной частью следовало бы оценить неопределённости выполненных измерений и расчётов по действующим отечественному и международному стандартам. На графиках отсутствуют пределы, соответствующие расширенной относительной неопределённости, с какой измерены величины.

Второе замечание. Автор уделяет заметное внимание прикладному значению работы, но не указывает, как распространить полученные на полусферической модели результаты на области иной формы.

Третье замечание. Заключение многословно и не структурировано. В тексте автореферата присутствуют огрехи стиля и отклонения от сложившейся терминологии.

Отмечу, что полученный отзыв на автореферат не оформлен должным образом, поэтому он больше для сведения членов диссертационного совета.

(Четвертый отзыв, *поступил только в электронном виде*) Кроме того, есть еще один отзыв на автореферат, который получен в электронном виде, но в назначенные сроки, чтобы диссертационный совет мог принять и учитывать этот отзыв, он не был получен в оригинале. Но для сведения диссертационного совета я сообщу, чтобы члены диссертационного совета могли это учесть. Это отзыв от доктора технических наук,

доцента Кухарева Алексея Леонидовича из Донбасского государственного технического университета. Отзыв положительный, с замечанием.

Замечание. В электродных установках интенсивность магнитного поля, создаваемого горизонтальными токопроводами, значительно увеличивается при питании их постоянным током по сравнению с трехфазным током промышленной частоты. Однако из автореферата непонятно, учитывалось ли магнитное поле токопроводов на ЭВТ в расплаве. Проводились ли мероприятия по уменьшению воздействия этого поля?

Председатель

Спасибо, Алексей Владимирович. Дмитрий Андреевич, вам слово для ответа на замечания.

Виноградов Д.А.

Спасибо за замечания. По поводу первого замечания ведущей организации, про влияние температуры. В данном случае, в данной постановке у нас происходит нагрев жидкого металла, но сверху. Также была оценена примерная мощность, выделяемая в узлах установки. Она составляла примерно 10 Вт, даже со стальным электродом. Поэтому влияние термогравитационной конвекции я считаю очень малым. Оно было также оценено с помощью численного моделирования. Получено, что полная энергия отличается примерно на 0,2%, а скорость в струе примерно на 0,37%. Также отмечу, что пульсации в системе охлаждения отсутствуют. При этом характерный диапазон рабочих температур, в максимальном случае при использовании стального электрода, составляет примерно 18 градусов. Также отмечу, что 600 секунд - достаточный перерыв, чтобы установка охладилась. Также вот графики: на них показано, что свойства зависят от температуры при использовании стального электрода. Тут видно, что в основном свойства меняются только в достаточно малой зоне, вблизи малого электрода, а в остальном объеме постоянны. Также справа снизу показан график, режимы 1 и 2 – это с учетом температуры и без, графики почти друг на друга накладываются. Можно не учитывать в данном случае влияние температурных эффектов.

По поводу второго замечания о трехмерных режимах и пристеночных экмановских слоях. В данном случае с замечанием согласен, да, трехмерные расчеты выполнялись только для одного режима, был сопоставлен режим для 10 ампер и магнитного поля 2×10^{-2} Тл. При этом в этом режиме азимутальные скорости практически совпадают со скоростями в двумерных осесимметричных расчетах. Но при этом систематическое исследование несимметричных режимов не проводилось. И это будет принято во внимание как повод для дополнительных исследований. По поводу экмановских слоев, да, k-ω SST модель была выбрана, потому что при ее использовании расчетные и экспериментальные данные лучше совпадали. При этом следует отметить, что сетка сгущалась только вблизи малого электрода, вблизи большого электрода она сгущена не была. Поэтому я бы сказал, что поскольку численные и экспериментальные данные согласуются, то учет экмановских слоев можно резюмировать как минимум качественный.

По поводу граничного условия на поверхности и его влияния на выводы по электродинамическому приближению и приближениям вообще. Когда сопоставляли электродинамическое и безындукционное приближения, на поверхность выливался раствор серной кислоты, и задавалось условие равенства нулю касательных напряжений. Металл закручивался, это было видно по водородным меткам. В данном случае использовалось такое граничное условие. И если сменить это условие на условие твёрдой стенки, то тогда граница некоторым образом сдвинется. Но каким образом – это повод для дополнительных расчётов.

При сравнении полной МГД-задачи с безындукционным приближением граничное условие было другим, но одинаковым для обоих расчётов. Это было сделано по той

причине, что при этом сопоставлении скорости достаточно большие. И чтобы как-то приблизить расчёт к физическим условиям, была принята твёрдая стенка – крышка, потому что скорость большая и жидкость просто разбрызгивалась бы, если бы не было крышки. Также изменение граничного условия может сместить численную границу, но не отменяет качественного вывода о применимости. То есть граница сместится, но не на несколько порядков. Я бы сказал, что в несколько раз в худшем случае.

По поводу пульсаций тока при выпрямлении, при использовании источника питания. Были проведены расчёты и сопоставлены режимы с пульсациями тока 20% и без них. На графике получается, что при пульсациях 20% скорость отличается примерно на 1,5%. Но опять же, при таком воздействии влиянием пульсаций, в принципе, можно пренебречь. При этом частота пульсаций составляет 300 Гц, и они не проявляются в пульсациях скорости, потому что инерционность системы велика.

По поводу погрешности корреляционного зонда. На данном графике приведён разброс значений, и видно, что при 400 А разброс наибольший. Поэтому для этого режима по критерию Уэлча было проверено, статистически значимо различие средних или нет. Было получено, что оно статистически значимо.

По поводу повторяемости: я согласен, что это не было подробно описано, но в данном случае для каждого режима была проведена серия от двух до пяти экспериментов. И разброс результатов укладывается в погрешность измерений.

По поводу глубины нахождения корреляционного зонда. Действительно, там разные глубины. Для получения амплитудно-частотных характеристик глубина – 10 мм, а для измерения средней скорости этим методом – 20 мм. Это сделано по той причине, что на глубине 10 мм точка измерения находится достаточно близко к месту формирования струи электровихревого течения. Течение достаточно нестабильное, и вектор скорости меняет направление со временем и не всегда направлен вдоль линии, соединяющей термопары. Поэтому погрешность в этой точке достаточно велика и составляет 35%.

По поводу волоконно-оптического датчика. Да, действительно, на малых скоростях погрешность датчика достаточно велика. Как раз основная погрешность связана с тарировкой датчика. Однако в данном случае этим датчиком были сопоставлены два режима: когда скорость достаточно велика и есть струйное течение, и нет восходящего вихря, и когда образуется восходящий вихрь и скорость пульсирует около нуля. Сопоставление этих двух режимов позволяло определить, образовался ли вихрь, и время его образования. В данном случае точности измерений было достаточно, чтобы сделать выводы об этом явлении.

По поводу замечаний Дениса Николаевича в отзыве на автореферат. Когда было задано граничное условие равенства нулю вектора скорости, это соответствовало таким физическим условиям, при которых на поверхности образуется оксидная плёнка, которую можно считать твёрдой с большой степенью точности. Следует отметить, что этот ответ справедлив, если поверхность не деформируется. При этом эксперименты у нас проводились в тех режимах, когда деформация поверхности была мала.

По поводу переносимости режимов. Для полной переносимости равенства параметров S и N недостаточно, поскольку важны геометрические характеристики. При этом для полусферической геометрии важным геометрическим симплексом является отношение радиусов малого и большого электродов, которое как раз влияет на выводы по автоколебаниям и может влиять на остальные результаты. В некоторых случаях это не влияет, но в данном случае параметры автоколебаний будут изменены, и диапазон магнитного поля, в котором они реализуются, также будет отличаться при изменении геометрических размеров.

По поводу замечаний Ольги Викторовны. На первое замечание я уже ответил при ответе на замечание ведущей организации: тепловыделением в данном случае можно пренебречь.

Второе замечание – по поводу воздействия магнитного поля на турбулентное течение и об эффекте подавления турбулентности. Следует отметить, что в работах, посвящённых именно электровихревым течениям, влияние эффекта подавления турбулентности найдено не было. По сути, этот вопрос остаётся открытым и не исследовался. Однако можно оценочно рассмотреть данный вопрос, перенося результаты для течения в трубах по критериям подобия.

В трубах подавление турбулентности начинается при числе Гартмана примерно больше 100. Если оценочно перенести эти результаты на полусферу при таком же числе, то получится магнитное поле примерно от 0,03 до 0,3 Тл. Такие режимы не исследовались экспериментально, а при численном моделировании было достаточно качественной оценки структуры течения. Спасибо.

Председатель

Дмитрий Андреевич, спасибо. Теперь мы переходим к заслушанию оппонентов. И первым слово предоставляется официальному оппоненту, доктору физико-математических наук, Соколову Дмитрию Дмитриевичу, МГУ имени Ломоносова. Пожалуйста, Дмитрий Дмитриевич.

Соколов Д.Д.

Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Соколова Д.Д. имеется в деле.

Председатель

Дмитрий Дмитриевич, спасибо. Теперь, Дмитрий Андреевич, Вам слово, пожалуйста.

Виноградов Д.А.

Спасибо за замечания. Сейчас постараюсь ответить. Отмечу, что действительно эти направления, в которых может быть применена работа, не были рассмотрены. Это может применяться в палеомагнитологии, а некоторые результаты могут быть перенесены на галактические струи.

Следует отметить, что, например, в палеомагнитологии требуется измерять магнитное поле, создаваемое образцами горных пород, чтобы восстановить древнее магнитное поле. Магнитное поле этих образцов составляет десятки нанотесл, и с этим возникает проблема. Поэтому там обычно применяются схожие методы компенсации магнитного поля. Я посмотрел: катушкой Максвелла они поле не компенсировали, но у них есть два варианта. Первый – катушка Гельмгольца, у которой компенсация похуже. По качеству компенсации между этими вариантами как раз была бы катушка Максвелла. Другой вариант – специальная схема, которая состоит уже из четырёх катушек. Там компенсация чуть лучше, чем у катушки Максвелла.

Что касается галактических струй, следует отметить, что иногда важно понимать, какое магнитное поле задано источником, а какое индуцируется при движении струи в магнитном поле, и отделять индуцированное поле от поля самого источника. Поэтому в данном случае методика, представленная в диссертации, могла бы быть перенесена. Но следует учитывать, что это приблизительное сопоставление, поскольку в галактических струях большое число Рейнольдса и существенны релятивистские эффекты.

По поводу публикаций – согласен. Действительно, в данном случае результаты представлены примерно на 10 конференциях и опубликованы в тезисах.

По поводу замечаний о модулях – да, согласен. На указанных страницах и рисунках приведены именно модули скорости, поскольку скорость направлена против оси.

По поводу размеров малого и большого электродов – да, с замечанием согласен в том плане, что в описании экспериментальной установки был указан диапазон размеров,

но в нашем случае эксперименты проводились только при диаметре малого электрода 5 мм. При этом электроды были как медные, так и стальные.

(*Отвечает на пятое замечание*). С замечанием согласен. Более правильная трактовка была бы такой: при магнитном поле 10^{-2} Тл и выше начинается электромагнитное торможение течения. При достижении 1 Тл полная кинетическая энергия течения становится сравнима с энергией для первого локального минимума.

По поводу трёхмерной постановки я уже отвечал на похожий вопрос ведущей организации.

Также я извиняюсь: я забыл ответить на замечания в отзывах, которые были оформлены не совсем правильно. По поводу замечания Кухарева Алексея Леонидовича о влиянии токоподводов. Да, мы специально уменьшали это влияние, увеличивая длину токоподводов. Длина вертикального участка верхнего токоподвода была увеличена до 1,2 метра, а нижнего – до 0,9 метра. При этом, если посчитать магнитное поле, эти токоподводы вносят компоненту B_z примерно 2×10^{-6} Тл. Основной вклад приходится на компоненту B_x, продольного магнитного поля. Она составляет примерно 8×10^{-5} Тл. Однако отмечу, что это влияние было изучено и нами, и пермскими коллегами. У них есть статья по этому поводу. Там написано, что продольное магнитное поле не приводит к существенным изменениям структуры течения.

(*Отвечает на замечания Сапожникова С.З.)*

По поводу погрешности – да, с замечанием согласен, стоило бы её представить. Но в данном случае в диссертации была оценена погрешность методов. Для волоконно-оптического датчика она составляет примерно 10% при скорости от 50 до 200 мм/с, а для корреляционного зонда – обычно 6–15%, в некоторых режимах достигает 35%. Для измерения скорости закрутки методом водородных меток погрешность составляет от 7,5 до 9,5%.

По поводу переноса результатов на другие геометрии: почти все схожие эффекты будут наблюдаться и в других геометриях. Однако значения магнитного поля, тока и остальных параметров, при которых они реализуются, будут уже другими. Это требует дополнительного исследования.

Третье замечание от Сергея Захаровича Сапожникова. Понял. Заключение не структурировано и многословно – с этим согласен. В будущем буду стараться.

Председатель

Дмитрий Андреевич, спасибо. Теперь слово предоставляется официальному оппоненту доктору технических наук Ячикову Игорю Михайловичу, Южно-Уральский государственный университет. Игорь Михайлович, пожалуйста, Вам слово.

Ячиков И.М.

Выступление официального оппонента не стенографируется. Положительный отзыв Ячикова И.М. имеется в деле.

Председатель

Игорь Михайлович, спасибо. Теперь слово Дмитрию Андреевичу для ответа на замечания.

Виноградов Д.А.

Спасибо за замечания. По поводу ЛАТРов. Однофазные ЛАТРы вместо трёхфазных используются из экономических соображений. Полученная схема из однофазных трансформаторов обеспечивает стабилизацию по напряжению, но не по току. То есть обеспечивает постоянное напряжение. Также вопрос о пульсациях источника уже был рассмотрен.

Термопары изготавливались из двух проволок в изоляции – медной и константановой. Затем они сваривались с помощью вольфрамового электрода, который был запитан от конденсатора при специально подобранном напряжении. При этом следует отметить, что диаметр королька 0,3 мм – это максимальный размер. Чувствительность термопары при достижении частоты 25 Гц падает примерно на 5%, а дальше снижение увеличивается.

По поводу систем координат. Были использованы выражения в цилиндрической и сферической системах координат по той причине, что расчётный пакет использует как раз эти системы координат. Также отмечу, что компоненты внешнего магнитного поля в декартовой системе координат записываются проще.

По поводу методики водородных меток. Тут две особенности. Первая – образуются пузырьки водорода, которые можно использовать как метки. Вторая – серная кислота добавляется, чтобы убрать оксидную плёнку. Если её не убрать, то это, по сути, твёрдая стенка, и скорость там равна нулю. Поэтому никакой закрутки мы не увидим, если добавить какие-нибудь метки.

По поводу научной новизны согласен. Также отмечу, что сравнение с другими работами, выделение особенностей и результатов были выполнены в диссертации в параграфе 4.5.

По поводу корреляционного датчика. В данном случае расстояние между термопарами было около 5 мм. Это расстояние было специально подобрано для нашего диапазона измерений – примерно от 30 до 200 мм в секунду. При этом турбулентность в данном случае положительно влияет на точность измерений. Однако следует отметить, что если вектор скорости во времени меняется по направлению и не направлен вдоль линии, соединяющей термопары, то погрешность резко увеличивается. По поводу использования при высоких температурах в промышленных агрегатах. Это можно сделать, например, используя вольфрам-рениевые термопары в защитной оболочке. Однако это будут, к сожалению, только кратковременные измерения – до деградации термопар.

По поводу измерения магнитного поля. Оно измерялось указанным прибором в точке на поверхности вблизи малого электрода. Внутри жидкого металла магнитное поле не измерялось.

С замечанием № 8 - согласен. Отмечу, что все уравнения были приведены, однако они изложены не совсем последовательно и идут не подряд. Полные конечные уравнения с учётом приближений представлены в описании численной методики на слайдах 10, 11 и 12. На 10-м слайде – простая сетка, на 11-м – трёхмерная, на 12-м – с учётом токоподводов. И сами уравнения там представлены.

По поводу некорректных предложений. Да, с этим замечанием согласен. В данном случае имелось в виду, что были записаны осциллограммы температуры и измерено именно среднее значение скорости.

По поводу эмпирической зависимости. Да, там не указана размерность. В данном случае это метры в секунду. Вроде бы всё, спасибо.

Председатель

Спасибо. Теперь мы переходим к дискуссии. Кто хотел бы выступить? Пожалуйста. Начну тогда я с вашего разрешения. На меня работа произвела очень хорошее впечатление. В первую очередь работа экспериментальная, что для меня всегда имеет свое особое значение. Во-вторых, эта работа выполнена в рамках сложившегося направления в институте, в ОИВТ РАН. И это направление связано с жидкометаллическими теплоносителями, причём здесь идёт речь как о некоторых физических эффектах, так и о ярко выраженных приложениях. Как известно, металлический теплоноситель является перспективным для термоядерных установок, по крайней мере, рассматривается в настоящее время. И там возникает вопрос, какой использовать теплоноситель. Здесь

задавались вопросы касательно ртути, в ОИВТ РАН есть и такие установки, но понятно, что при работе на них есть целый ряд ограничений. Объяснять не нужно. А вот то, что работа была сделана для ряда металлов – это безусловный плюс этой работы.

Ну и, по-моему, Дмитрий Андреевич продемонстрировал необходимую квалификацию. Он к настоящему времени является уже вполне состоявшимся экспериментатором и, на мой взгляд, заслуживает присвоения учёной степени.

Пожалуйста, кто ещё? Да, пожалуйста, Николай Викторович.

Васильев Н.В.

Уважаемые члены диссертационного совета, я хотел бы сказать пару слов в поддержку работы Дмитрия Андреевича. Подготовка кадров – кандидатов наук, которые могут самостоятельно вести научные исследования, – это важная часть работы института и лабораторий. И когда я в прошлом году стал заведующим лабораторией и возник этот вопрос, наш сегодняшний диссертант оказался очень хорошим кандидатом для этого. Он закончил аспирантуру ОИВТ РАН. У него уже был накоплен достаточный материал, представленный в более чем достаточном количестве публикаций, в частности в журналах Q1. Этот материал был широко апробирован на множестве конференций, поэтому оставалось просто немного его подтолкнуть и поддержать.

Также Дмитрий Андреевич обладает компетенциями не только как экспериментатор, но и в области численного моделирования, которое он достаточно успешно применяет в своей работе, и сегодня при защите диссертации он это продемонстрировал. У нас в лаборатории он работает не только в рамках госзадания, но и участвовал и продолжает участвовать в выполнении грантов РНФ, поэтому он является одним из основных сотрудников лаборатории.

И его повышение квалификации в случае, очень надеюсь, успешной защиты диссертации, на мой взгляд, станет определённой наградой за его долголетний труд и стимулом для дальнейшей работы по развитию лаборатории. Уважаемые члены диссертационного совета, со своей стороны я бы рекомендовал поддержать его работу. Спасибо.

Председатель

Николай Викторович, спасибо.

Я что хотел бы отметить: здесь было сказано не только об эксперименте, но и о моделировании. Но, знаете, сегодня с 11:00 в этой аудитории ещё не прозвучали слова искусственный интеллект. Вот что удивительно, потому что открываешь любые новости – в любом канале, на любых новостных сайтах – везде об этом говорят. Здесь, по-видимому, работа ещё не требует обработки такого большого массива данных, когда возникает необходимость в его использовании. Но, как я понимаю, кадры у нас уже есть, которые вполне могут это сделать. Это очень здорово.

И я ещё от себя хотел добавить. Здесь было сказано про слабые магнитные поля и магнитное поле Земли. Вообще этот эффект действительно удивительный. Мы соприкоснулись с этим в своё время, когда исследовали плазму разрядов с взвешенными частицами. Так оказалось, что, когда помещаешь туда частицы никеля, они чувствуют магнитное поле, причём как раз окружающее.

Для меня это тоже был некий барьер: ведь поля настолько слабые. Влияние геомагнитного поля на сам газовый разряд, на плазму – это понятно, но вот именно никелевые частички реагируют сами, не за счёт магнитных свойств плазмы. Вот это поразительно.

Вот здесь, пожалуй, это второй поразительный эффект, когда в экспериментах оказывается существенным магнитное поле Земли. Хотя компасы известны не одно столетие, это всё равно любопытно.

Ещё кто хотел бы высказаться или всё ясно? По-моему, картина действительно очень понятная. В таком случае предоставляется заключительное слово соискателю, и перейдём к голосованию. Спасибо.

Виноградов Д.А.

Со своей стороны я хотел бы поблагодарить всех членов диссертационного совета, ведущую организацию и оппонентов за внимание к моей работе. Также я благодарен научному руководителю за помощь и поддержку на всех этапах работы. Я благодарен институту за создание условий, в которых можно вести научно-исследовательскую работу. Также отмечу и других коллег нашей лаборатории. Их я тоже благодарю за помощь и поддержку.

Председатель

Спасибо. Слово Алексею Владимировичу.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, напоминаю, что наше заседание проводится в комбинированном очно-дистанционном режиме, и голосование проводится с использованием телекоммуникационных систем, то есть на сайте нашего института. Прошу всех членов диссертационного совета, присутствующих очно или дистанционно, войти под своим логином и паролем на сайт ОИВТ РАН со своего устройства или с компьютера диссертационного совета и проголосовать.

(Проводится процедура тайного голосования)

Председатель

Пока идет голосование, можно обсудить проект заключения. Кто хотел бы здесь выступить?

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения)

Тогда мы дождемся результатов голосования и перейдем к утверждению проекта заключения.

Ученый секретарь

Дорогие коллеги, голосование завершено. Зачитываю результаты. Всего на заседании присутствовало 25 членов диссертационного совета, в том числе 10 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации. Очно присутствовало 17 членов диссертационного совета, в том числе 7 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации. Онлайн присутствовало 8 членов диссертационного совета, в том числе 3 доктора наук по профилю рассматриваемой диссертации. Всего получено 25 голосов: за – 25, против – 0.

Председатель

Хорошо, есть ли вопросы?

Тогда давайте утвердим протокол. Кто за? Против? Воздержался? Нет.

(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно).

Есть ли еще замечания по проекту заключения?

Кто за утверждение проекта заключения с замечаниями? Против? Воздержался? Нет.

(Проект заключения принят единогласно).

Давайте поздравим Дмитрия Андреевича. Очень хорошая работа получилась. Спасибо всем за работу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.193.01 (Д 002.110.02), СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14.10.2026г. № 9

О присуждении Виноградову Дмитрию Андреевичу, гражданину Российской Федерации ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Электровихревое течение жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего магнитного поля» по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 27.05.2026г., (протокол заседания № 5) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Виноградов Дмитрий Андреевич 1989 года рождения, в 2013 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»».

Работает в должности научного сотрудника лаборатории № 10.2 – теплообмена в энергетических установках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

В 2025 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории № 10.2 – теплообмена в энергетических установках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Научный руководитель кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 10.2 – теплообмена в энергетических установках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук Тепляков Игорь Олегович.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор кафедры математики физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Соколов Дмитрий Дмитриевич;
- доктор технических наук, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Ячиков Игорь Михайлович

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь) в своем положительном заключении, составленном зав. лабораторией технологической гидродинамики «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УРО РАН») доктором физико-математических наук Колесниченко И.В. (утвержденном 28.09.2026г. директором чл.-корреспондентом РАН Плеховым О.А.) указала, что научная

значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов. Впервые в рассматриваемой постановке экспериментально установлено уменьшение осевой скорости ЭВТ под действием магнитного поля Земли и исследованы характеристики автоколебаний, обусловленных взаимодействием первичного и вторичного тороидальных вихрей. Получена зависимость времени формирования восходящего тороидального вихря от внешнего магнитного поля и рассчитана граница раздела одновихревого и двухвихревого режимов. Определена область применимости электродинамического приближения при наличии внешнего магнитного поля и выявлен эффект электромагнитного торможения ЭВТ под действием индуцированных электрических токов в сильных полях. Существенным результатом является также систематическое описание структуры ЭВТ в интервале внешних магнитных полей от величины, сопоставимой с полем Земли, до 1 Тл.

Полученные результаты представляют практический интерес для процессов электродугового и электрошлакового переплава, электрошлаковой сварки и иных технологий, в которых внешнее магнитное поле используется для управления движением жидкого металла. Такие процессы разрабатываются и используются, в частности, в ОИВТ РАН, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ПАО «Протон-ПМ», ООО «Электродуговые технологии», ОАО «Красцветмет».

Соискатель имеет 35 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 13 работ, 11 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК или входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus:

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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Teplyakov, I. Applicability of different MHD approximations in electrovortex flow simulation / I. Teplyakov, D. Vinogradov, Yu. Ivochkin, A. Kharicha, P. Serbin // Magnetohydrodynamics. – 2018. – Vol. 54. – P. 403–416.
9. 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.

10. 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.
11. Vinogradov, D. Calculation of the Magnetic Field of a Current-Carrying System / D. Vinogradov, I. Teplyakov, Yu. Ivochkin // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. – P. 3623.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»** (зав. кафедрой инженерной теплофизики д.ф.-м.н., доцент Герасимов Д.Н.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- Каким физическим условиям соответствует численное моделирование течения с граничным условием в виде нулевой скорости на поверхности жидкости?
- Насколько переносимы результаты диссертации о структуре течения в исследуемой установке на другие условия, т.е. достаточно ли равенства указанных в работе безразмерных параметров (в частности, S и N) для выводов о формировании, например, автоколебательного режима? Не будут ли критичными симплексы для описания условий образования тех или иных пространственных структур и режимов?

2. **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»** (д.т.н., профессор Митрофанова О.В.) – отзыв положительный, с замечаниями:

- автор рассматривает среду с внутренним тепловыделением, при этом токи в установке достигают сотен ампер, но про роль свободной конвекции ничего не говорится.
- автор рассматривает воздействие магнитного поля на турбулентное течение жидкого металла, но ничего не говорит об эффекте подавлении турбулентности.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Соколов Д.Д., является признанным специалистом в области теории магнитной гидродинамики и её приложений к астрофизическим задачам. Общность физических закономерностей и методов описания взаимодействия течений проводящих сред с магнитным полем позволяет ему компетентно оценить обоснованность используемых в диссертации приближений, достоверность результатов и их научную значимость.

1. Dukanov, I. Transformation of solar wind energy and helicity spectra in the frame of magnetohydrodynamics shell modeling / I. Dukanov, E. Yushkov, P. Frick, D. Sokoloff // Physical Review E. – 2026. – Vol. 113. – P. 055208. link.aps.org
2. Abushzada, I. Turbulent dynamo in the shell model and the Kazantsev-Kraichnan approach / I. Abushzada, E. Yushkov, P. Frick, D. Sokoloff // Physical Review E. – 2025. – Vol. 112. – P. 015104. Phys. Rev. E
3. Abushzada, I. Small-scale Kazantsev-Kraichnan dynamo in a MHD shell approach / I. Abushzada, E. Yushkov, P. Frick, D. Sokoloff // Physica Scripta. – 2023. – Vol. 98. – P. 115966.

- д.т.н., профессор Ячиков Игорь Михайлович является признанным специалистом в области технологических процессов в металлургии, в том числе исследования электровихревых течений. Его научная специализация непосредственно связана с тематикой диссертации, что позволяет ему компетентно оценить достоверность полученных результатов и их практическую значимость для управления течениями жидких металлов в металлургических процессах.

1. Chumanov, I. V. Effect of Rotation of a Consumable Electrode on the Hydrodynamics of the Slag Bath during Electroslag Remelting / I. V. Chumanov, I. M. Yachikov, M. I. Yachikov, M. A. Matveeva, D. V. Sergeev // Russian Metallurgy (Metally). – 2024. – Vol. 2024. – No. 6. – P. 1291–1297.
2. Вяткин, Г. П. Математическое моделирование влияния места доставки капель электродного металла на глубину металлической ванны при электрошлаковом

переплаве / Г. П. Вяткин, М. А. Матвеева, И. В. Чуманов, И. М. Ячиков // Черные металлы. – 2023. – № 10. – С. 10–14.

3. Chumanov, I. V. Mathematical Model for the Thermal State of the Liquid Metal Bath in an ESR Plant for Producing a Hollow Ingot / I. V. Chumanov, I. M. Yachikov, D. V. Sergeev // Russian Metallurgy (Metally). – 2021. – Vol. 2021. – No. 6. – P. 689–695.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук выбран в качестве ведущей организации в связи с многолетним опытом исследований в области магнитной гидродинамики, проводимых в его филиале – Институте механики сплошных сред УрО РАН. В институте выполняются экспериментальные и численные исследования течений жидких металлов под действием электромагнитных сил, в том числе электровихревых течений, а также разрабатываются методы управления такими течениями и их технологические приложения. Указанные направления непосредственно связаны с тематикой диссертационной работы. Научный опыт и квалификация специалистов института позволяют всесторонне оценить обоснованность применяемых методов, достоверность полученных результатов, их научную новизну и практическую значимость.

1. Frick, P. Electro-vortex flows in a cylindrical cell under axial magnetic field / P. Frick, S. Mandrykin, V. Eltishchev, I. Kolesnichenko // Journal of Fluid Mechanics. – 2022. – Vol. 949. – Art. A20.
2. Eltishchev, V. The influence of a cylindrical cathode on the electro-vortex flow of liquid metal: Numerical simulations and laboratory experiments / V. Eltishchev, S. Mandrykin, I. Kolesnichenko // Europhysics Letters. – 2022. – Vol. 137. – Art. 13001.
3. Poluyanov, A. Experimental study of liquid metal flow for the development of a contact-less control technique / A. Poluyanov, I. Kolesnichenko // Fluid Dynamics and Materials Processing. – 2024. – Vol. 20. – No. 7. – P. 1553–1564.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Получены экспериментальные зависимости осевой скорости в струе электровихревого течения от значения электрического тока, которые свидетельствуют, что магнитное поле Земли снижает осевую скорость в области струи электровихревого течения на 30–50 %, по сравнению с режимом компенсации геомагнитного поля.

– Получены численно-экспериментальные зависимости периода автоколебаний и времени образования вторичного тороидального вихря от значения внешнего магнитного поля.

– Получена расчетная граница раздела одновихревого и двухвихревого режима течения в координатах внешнее магнитное поле – электрический ток.

– Получен критерий применимости электродинамического приближения, нарушение которого проявляется в завышении азимутальной скорости течения по сравнению безындукционным приближением и экспериментальными данными при внешнем магнитном поле $B_z > 1.25\times10^{-3}$ Тл.

– Обнаружен эффект электромагнитного торможения электровихревого течения, связанный с влиянием электрических токов, индуцированных движением электропроводящей среды во внешнем магнитном поле $B_z > 10^{-2}$ Тл.

Научная новизна работы заключается в получении новых экспериментальных и численных данных о структуре и динамике электровихревого течения жидкого металла в полусферическом контейнере при воздействии внешнего осевого магнитного поля.

Впервые проведено прямое экспериментальное сравнение режимов с учетом влияния геомагнитного поля и с компенсацией его осевой компоненты. Сравнение показало

снижение осевой скорости в области струи электровихревого течения под действием магнитного поля Земли.

Установлены закономерности изменения периода автоколебаний и зависимость времени формирования восходящего тороидального вихря с ростом внешнего магнитного поля. Численно определена граница между одновихревым и двухвихревым режимами течения.

Определены границы применимости магнитогидродинамических приближений для электровихревого течения. Выявлен режим электромагнитного торможения, обусловленный электрическими токами, индуцированными движением электропроводящей среды и установлены особенности перестройки структуры течения в диапазоне внешнего магнитного поля от 5×10^{-5} до 1 Тл.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– Показано влияние магнитного поля Земли на осевую скорость в струе электровихревого течения при электрических токах 100–450 А. Полученные результаты обосновывают необходимость оценки влияния магнитного поля Земли при построении расчётных моделей таких течений.

– Установлены границы применимости различных магнитогидродинамических приближений, что позволяет обоснованно выбирать уровень описания электромагнитных процессов в исследуемом диапазоне параметров, обеспечивая требуемую точность численного моделирования при приемлемых вычислительных затратах.

– Выявленный эффект электромагнитного торможения расширяет представления о механизмах электровихревых течений во внешнем магнитном поле и показывает существенную роль индуцированных электрических токов в изменении структуры и интенсивности течения.

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

– Показана возможность измерения осевой скорости электровихревого течения жидкого металла корреляционным методом. Полученные результаты служат основой для адаптации данного метода к измерениям в высокотемпературных промышленных агрегатах при использовании термопар, обладающих достаточной термостойкостью.

– Установлена немонотонная зависимость интенсивности электровихревого течения в исследуемом диапазоне внешнего магнитного поля от 5×10^{-5} до 1 Тл. Обнаружено существование минимума при $B_z \sim 10^{-4}$ Тл и максимума при $B_z \sim 10^{-2}$ Тл, а также последующее уменьшение интенсивности течения при увеличении внешнего магнитного поля до 1 Тл. Эти особенности следует учитывать при проектировании промышленных систем, где внешнее магнитное поле является методом управления структурой электровихревого течения.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях занимающихся магнитной гидродинамикой или проектированием промышленных агрегатов электрошлакового и электродугового переплава, а также электрошлаковой сварки. Такие процессы разрабатываются и используются, в частности, в ОИВТ РАН, ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», ПАО «Протон-ПМ», ООО «Электродуговые технологии», ОАО «Красцветмет».

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается приведенными погрешностями методов измерения, а также согласования экспериментальных результатов с расчетными данными. При этом ряд особенностей течения совпадает с литературными данными других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в расширении информации о структуре и особенностях электровихревого течения при влиянии внешнего осевого магнитного поля. Автором был внесен решающий вклад в проведение численных и экспериментальных исследований, при этом соискатель принимал активное участие в анализе и интерпретации полученных результатов.

Апробация результатов исследования проводилась на 10 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе также подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Виноградов Дмитрий Андреевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями или привел собственную аргументацию.

На заседании от 14.10.2026г. диссертационный совет постановил за решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны присудить Виноградову Дмитрию Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 25 человек, из них очно: 8 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 4 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 3 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 25, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председателя диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
Академик РАН

Петров О.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)
к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.
14.10.2026г.