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.