

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 № 82

О присуждении Лосеву Геннадию Леонидовичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Измерения характеристик и контроль МГД-процессов» по специальности 1.1.9 (01.02.05) «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 09.09.2021, протокол № 76, 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 Лосев Геннадий Леонидович 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. Ячиков Игорь Михайлович, доктор технических наук (05.13.18), профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)" (г. Челябинск);
2. Вяткин Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук (01.02.05), доцент кафедры физики и технологии ФГБОУ ВО "Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет" (г. Пермь);
дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Удмуртский государственный университет" (УдГУ), г. Ижевск, в своем положительном заключении, составленным д.ф.-м.н., доцентом, заведующим учебно-исследовательской лабораторией физики конденсированных сред М.Д. Кривилевым; к.ф.-м.н. С.А. Груздь; председателем семинара к.ф.-м.н. С.А. Ломаевым; ученым секретарем семинара к.ф.-м.н.

О.О. Гавриленко, и утвержденном ректором УдГУ, д.ист.н., профессором Г.В. Мерзляковой, указала, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, хорошо оформлена и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, имеющую фундаментальное и прикладное значение. Практическая значимость работы состоит в углублении понимания механизмов генерации течений в жидких металлах и развития измерительных методик. Изложенные результаты могут быть востребованы в технике для оптимизации процессов перемешивания и кристаллизации металлов с целью снижения энергозатрат и повышения качества отливок, а так же в области очистки и переработки отходов металлургического производства. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных экспериментальных результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики жидкости, газа и плазмы. Представленная диссертационная работа «Измерения характеристик и контроль МГД-процессов» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Лосев Геннадий Леонидович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 (01.02.05) – Механика жидкости, газа и плазмы.

Соискателем опубликовано 10 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Losev G.**, Kolesnichenko I. Solidification front shape control through modulating the traveling magnetic field // Journal of Crystal Growth. 2019. V. 528. P. 125249.

Показана возможность управления формой фронта кристаллизации жидкого металла посредством низкочастотных модуляций питания индукционного перемешивателя.

2. **Losev G.**, Kolesnichenko I. Structure of MHD vortex flows in a thin layer of liquid metal // Magnetohydrodynamics. 2019. V. 55, № 1-2. P. 97-105.

Экспериментально изучен процесс изменения структуры вихревых течений электропроводной жидкости при смещении области локализованного силового воздействия.

3. **Losev G.**, Pavlinov A., Kolesnichenko I., Shvydkiy E., Sokolov I. Effective stirring of liquid metal by a modulated travelling magnetic field // Magnetohydrodynamics. 2019. V. 55, № 1-2. P. 107-114.

Численно и экспериментально найдены зависимости характеристик течений жидкого металла от величины воздействия бегущего магнитного поля и периода модуляции.

4. **Losev G.**, Kolesnichenko I. The influence of the waveguide on the quality of measurements with ultrasonic Doppler velocimetry // Flow Measurement and Instrumentation. 2020. V. 75. P. 101786.

Подробно изучено влияние волноводов различной геометрии и материала на качество ультразвуковых измерений скорости в жидких металлах.

5. **Losev G.**, Mamykin A., Kolesnichenko I. Electromagnetic separation: concentration measurements // Magnetohydrodynamics. 2019. V. 55, № 1-2. P. 89-96.

Экспериментально показана возможность разделения фаз различной проводимости посредством электромагнитного воздействия. Изучено влияние геометрии канала на эффективность процесса разделения фаз.

6. Losev G., Mamykin A., Kolesnichenko I. Model of electromagnetic purification of liquid metal // Magnetohydrodynamics. 2021. V. 57, № 1. P. 73-84.

Изучено влияние параметров электромагнитного и гидравлического воздействия на эффективность разделения фаз с разной электропроводностью электромагнитным методом.

7. Losev G., Khalilov R., Kolesnichenko I. UDV study of a liquid metal vortex flow // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 208. P. 012022.

Разработана методика измерений скорости течения жидкого галлиевого сплава при помощи ультразвуковой доплеровской анемометрии с учетом изменения температуры и распределения примеси в металле.

8. Losev G.L., Kolesnichenko I.V., Khalilov R.I. Control of the metal crystallization process by the modulated traveling magnetic field // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1128. P. 012051.

Найдены структуры вихревых течений, возникающих в слое жидкого металла металла под действием бегущего магнитного поля и их влияние на процесс кристаллизации металла.

9. Shvydkiy E., Kolesnichenko I., Khalilov R., Pavlinov A., Losev G. Effect of travelling magnetic field inductor characteristics on the liquid metal flow in a rectangular cell // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 424. P. 012012.

Численно и экспериментально изучена структура вихревых течений электропроводной жидкости под действием бегущего магнитного поля в ячейке промышленных масштабов.

10. Losev G., Pavlinov A., Shvydkiy E., Sokolov I., Kolesnichenko I. Stirring flow of liquid metal generating by low-frequency modulated traveling magnetic field in rectangular cell // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 581. P. 012005.

Изучено влияние низкочастотных модуляций бегущего магнитного поля на структуру возникающих в жидком проводнике течений.

Публикации содержат в сумме 74 страницы 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 Ячикова И.М. 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:

- В диссертации утверждается, что процесс нагрева жидкого металла происходит за счет Джоулева тепла при вихревых течениях электромагнитной природы и вязкого трения (стр. 70 и 77). Однако элементарные оценки показывают, что вторая составляющая при рассматриваемых скоростях течения жидкости в тепловой баланс вносит пренебрежимо малый вклад.
- В работе несколько раз указывается, что структура поля ЭМ сил при магнитовихревом течении (МВТ) подобна электровихревому течению (ЭВТ), однако при

этом не приведены числа физического подобия. Например, какая амплитуда магнитного поля МВТ соответствует какому электрическому току ЭВТ?

- Почему при локализации положения фронта кристаллизации галлиевого сплава принимается середина третьего локального максимума профиля эхо (стр. 92)? На рис. 2.8 видно, что локальных максимумов (>75% от максимума сигнала) довольно много. Сам диссертант пишет, что разброс экспериментальных точек превышал погрешность метода (рис. 2.9). Возможно, имело смысл с помощью используемого диссертантом пакета Matlab провести обработку этих данных посредством *кластерного анализа* и найти координаты центра кластера (или центров кластеров)?
- В работе в разных главах рассматриваются двухвихревые, четырехвихревые структуры течения жидкого металла в каналах экспериментальных установок. Почему не были приведены принципиальные схемы или рисунки, показывающие расположение и наглядное динамическое поведение возникающих вихрей?
- При рассмотрении эксперимента по кристаллизации в условиях перемешивания из диссертации осталось неясным, из какого материала была изготовлена кювета, также не определено условие теплообмена на нижней стороне канала, влияющие на кристаллизацию металла.
- Известно, что толщина затвердевшего слоя металла пропорциональна закону квадратного корня от времени, значит, от времени зависит и скорость фронта кристаллизации. Как обеспечивалось это условие при измерении скорости движения фронта кристаллизации для разных значений силы тока и для разных периодов реверсивной модуляции?
- Не совсем четко показана взаимосвязь между главами диссертации, хотя конечно она прослеживается, так как эти главы полностью вписываются в тему диссертационной работы. Во всех главах используются одни и те же датчики (УДА) и близкие друг к другу методики измерения.
- Работа имеет сугубо экспериментальный характер, что ограничивает возможности получения данных о поведении рассматриваемых физических систем, например пространственных структур течений, при масштабировании геометрии и физических параметров. При изучении МГД-течений, двухфазных потоков кроме размерных величин необходимо было определить в условиях эксперимента и в получаемых результатах диапазон изменения безразмерных величин, влияющих на изучаемый процесс: число Рейнольдса Re , магнитное число Рейнольдса Re_m , число Гартмана Ha и пр. Это бы существенно расширило область использования результатов рассматриваемой работы.
- Выбор конкретного экспериментального метода исследования часто ограничивал возможности вариации управляющих параметров, например, в задаче об управлении формой фронта кристаллизации имеем весьма узкую область параметров воздействия.
- Использование некоторых терминов не совсем корректно: *модуляция питания* линейного индукционного перемешивателя (стр. 6), силы *плавучести* (стр. 14, 107), благоприятные и неблагоприятные МГД-течения (стр. 42), *режим заморозки металла* (стр.103). Некоторые из них нужно было просто взять в кавычки.
- В обзоре методов измерения скорости в жидких металлах нет упоминания об уникальной отечественной разработке волоконно-оптического анемометра ОИВТ РАН (лаборатория теплообмена в энергетических установках Ю.П. Ивочкина).

- Несколько странный стиль подачи материала, сначала записываются формулы, а ссылка и упоминание про них находится далее по тексту, например формулы (21)–(22) приведены на 30 стр., а упоминание про них находится на 31 стр.
- Диссертант при постановке задачи очистки проводящих сред пишет: *При очистке больших объёмов расплавленного металла, данный способ становится энергозатратным, поскольку требует непрерывного поддержания металла в расплавленном виде в течение нескольких дней подряд.* Непонятно, про какие объёмы металла ведётся речь, и где применяется данная технология.

2. Положительный отзыв официального оппонента Вяткина А.А. В отзыве отмечено, что диссертация посвящена актуальной проблеме отработки методов измерения и корректного электромагнитного воздействия в процессах перемешивания, очистки и кристаллизации жидких металлов. Оппонент отмечает следующие замечания:

- Вводная часть работы содержит подробный обзор литературы, который слабо связан с основной частью диссертации. Например, на страницах 15-32 приведен широкий обзор методов измерения скорости в жидких металлах, а в работе используется только ультразвуковой доплеровский анемометр. Отсутствует сравнение результатов измерений, полученных с использованием различных экспериментальных методик.
- Отсутствует сравнение результатов исследования, проведенных в рамках диссертационной работы, с результатами других авторов.
- Выводы по главе 2 на странице 105 «Увеличение силы тока питающего индуктор бегущего магнитного поля (т.е. рост магнитного потока) до 5.0 А и выше обеспечивают максимальную среднюю скорость течения...» содержат размерные результаты. Очевидно, что при изменении масштаба задачи приведенные данные теряют смысл.
- В начале параграфа 3.3 указано, что относительная концентрация частиц примеси определялась в экспериментах двумя методами, но на рисунке 3.4 представлены результаты, полученные тремя методами. Описание измерений концентрации примеси ультразвуковыми методами отсутствует.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области совершенствования методов измерения и контроля течений жидких металлов, возникающих под действием электромагнитных сил в условиях фазовых переходов и наличия примесей. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость – ряд результатов может быть использован для оптимизации процессов перемешивания и кристаллизации металлов с целью снижения энергозатрат и повышения качества отливок.

Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- Результаты лабораторного эксперимента по изучению сепарации частиц были аппроксимированы квадратичной зависимостью, что при полученном ограниченном наборе данных не может быть достоверно сделано;
- В разделе по исследованию кристаллизации приведена зависимость скорости кристаллизации от силы тока в индукторе. График показывает сильно немонотонную зависимость. Предложенное объяснение неочевидно и требует большего обоснования.
- В тексте отсутствует список сокращений и обозначений, хотя соискатель активно их использует без соответствующей расшифровки.

- Параметры модуляции тока в индукторе и характеристики генерируемого магнитного поля являются самостоятельными управляющими параметрами системы и могут варьироваться независимо друг от друга. В работе диссертантом не была сделана попытка анализа одновременного влияния двух параметров на структуру течения, что может дать важную новую информацию об оптимальных режимах течения.

На автореферат поступило 6 отзывов:

1. Положительный отзыв от Беляева И.А., к.т.н., заведующего лабораторией инженерной теплофизики ФГБУН "Объединенный институт высоких температур РАН", г. Москва (3 замечания);
2. Положительный отзыв от Веденеева В.В., д.ф.-м.н., доцента, заведующего лабораторией экспериментальной гидродинамики НИИ механики ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова", г. Москва (2 замечания);
3. Положительный отзыв от Демина В.А., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой теоретической физики ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь (3 замечания);
4. Положительный отзыв от Разуванова Н.Г., д.т.н., ведущего научного сотрудника ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет «МЭИ»", г. Москва (2 замечания);
5. Положительный отзыв от Сапожникова С.З., д.т.н., профессора Высшей школы атомной и тепловой энергетики ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", г. Санкт-Петербург (3 замечания);
6. Положительный отзыв от Теплякова И.О., к.т.н., старшего научного сотрудника ФГБУН "Объединенный институт высоких температур РАН", г. Москва (2 замечания).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- Для обобщения полученного массива данных автор использует безразмерный параметр силового воздействия S . Физический смысл этого критерия никак не объяснен в автореферате.
- Автор не указывает какой именно галлиевый сплав и какой именно электролит он использовал в своей работе.
- Для 3 части работы, выносимой на защиту, автор использовал электролит. Каковы рекомендации автора по конструкции сепарационных устройств в случае применения жидкого металла.
- В главе 2 не объясняется механизм, из-за которого прекращается рост интенсивности перемешивания при увеличении силы тока.
- Точки 2 и 3 на рис. 12 образуют сплошное облако, что, возможно, говорит о квазихаотическом процессе сепарации. В автореферате не объясняется природа такого поведения.
- Не совсем понятно, как по двумерным полям карты режимов ЭВТ автор судит о структуре течения: двух-вихревой или четырёх-вихревой.
- Для хорошего пространственного разрешения волны кристаллизации четырёх ультразвуковых датчиков все-таки недостаточно, может имеет смысл проработать возможность применения подвижного зонда (в качестве рекомендации).

- Заглавие работы слишком общее и не отражает в полной мере задач, успешно решённых в главах 2 и 3.
- На рис. 8 обозначены доверительные интервалы измененных величин, но не указано, каким путём получены такие оценки. Нет сведений о неопределенностях измерений в соответствии с действующими российскими и международными стандартами.
- Выводы не вполне структурированы и многословны.
- Ссылка 28 в списке литературы выглядит весьма странно.
- В разделе «Актуальность и степень разработанности темы исследования» не совсем четко расставлены акценты в отношении общих положений, касающихся состояния дел в металлургии.
- Не совсем понятна фраза на стр. 3: «Целью работы является отработка методов измерения и корректного электромагнитного воздействия в процессах перемешивания, очистки и кристаллизации жидких металлов»

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

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области физики, механики жидкости, газа и плазмы, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация Институт математики, информационных технологий и физики ФГБОУ ВО УдГУ является одним из ведущих научных центров в области гидромеханики и теплообмена, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по физике фазовых переходов, математическое и физическое моделирование процессов кристаллизации и вихревых течений. УдГУ регулярно организует и проводит международную конференцию «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии».

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 расширенного научного семинара Института математики, информационных технологий и физики УдГУ в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны методики экспериментов и алгоритмы обработки экспериментальных данных, позволившие провести исследования магнитогидродинамических течений при наличии осложняющих факторов – фазового перехода и частиц примеси.

предложены новые способы управления формой фронта кристаллизации, а также конструкция электромагнитной ячейки разделения фаз;

доказана необходимость учета влияния стенок каналов при ультразвуковых исследованиях потоков жидкостей;

введены управляющие параметры, определяющие области течений различной конфигурации.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что доказана

– возможность управления энергетическими и спектральными характеристиками вихревого течения жидкого металла в плоском слое при смещения области силового воздействия;

– возможность влияния на форму фронта кристаллизации посредством низкочастотных модуляций воздействующего на расплав бегущего магнитного поля;

– найдены основные закономерности влияния величины силового воздействия, расхода транзитного течения и геометрии канала на эффективность процесса разделения фаз и возможность извлечения примесей из жидкой проводящей среды;

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

использованы современные экспериментальные методики как традиционно применяемые в экспериментальной магнитной гидродинамике, так и оригинальные, разработанные автором работы;

изложены физические соображения, объясняющие возможности электромагнитного управления процессами фазовых переходов в жидких металлах;

раскрыты особенности применения метода ультразвуковой доплеровской анемометрии для локализации границы раздела фаз в процессе направленной кристаллизации;

изучены условия возникновения, структура и физические механизмы генерации вихревых течений жидких электропроводящих сред в задачах перемешивания, кристаллизации и очистки жидкостей в зависимости от параметров внешнего силового воздействия;

проведена модернизация экспериментальных установок для исследования направленной кристаллизации и очистки жидких проводящих сред.

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

разработана и внедрена в лабораторных исследованиях новая методика управления формой фронта кристаллизации;

определены области силовых параметров, обеспечивающие наилучшее управление процессами перемешивания, кристаллизации и очистки жидких проводящих сред. Результаты могут быть использованы при планировании экспериментальных исследований и проектировании технологических процессов, в которых влияние на жидкие металлы осуществляется электромагнитными методами;

создана база экспериментальных данных для верификации теоретических моделей;

представлены методические рекомендации по проектированию систем электромагнитной очистки жидких проводящих сред и раскрыты перспективы дальнейших исследований.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ исследования проведены с применением современного оборудования и современных экспериментальных методов, прошедших дополнительную апробацию на модельных задачах, что позволило обеспечить воспроизводимость и высокую точность полученных результатов;

идея базируется на обобщении имеющегося опыта исследований потоков жидких металлов, вызываемых действием электромагнитных сил, в том числе для многофазных сред;

использовано сравнение полученных в диссертации результатов с результатами известных экспериментальных и теоретических исследований для оценки применимости новых экспериментальных методик;

установлено удовлетворительное качественное и количественное соответствие полученных данных известным результатам теоретических и экспериментальных исследований в пересекающихся областях параметров;

использованы современные экспериментальные методики измерения скорости, концентрации и температуры, а также современные методы цифровой обработки и анализа данных.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач, планировании экспериментов и интерпретации результатов, участие в создании экспериментальных установок и проведении опытов. Постановка задач и обсуждение результатов исследований, представленных в первой главе, были выполнены совместно с научным руководителем П.Г. Фриком и И.В. Колесниченко, проведение экспериментов и обработка результатов выполнены автором лично. Результаты исследований, изложенные во второй главе диссертации, получены автором лично. Из результатов, представленных в третьей главе диссертации, автору принадлежит участие в проведении опытов и интерпретация данных. Измерения проведены совместно с А.Д. Мамыкиным.

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 задач об электромагнитном управлении процессами сглаживания фронта кристаллической фазы при направленной кристаллизации и очистки жидких металлов.

На заседании 11 ноября 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Лосеву Г.Л. ученую степень кандидата физико-математических наук.

