

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.012.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТА МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 08.12.2016 № 141

О присуждении *Павлинову Александру Михайловичу*, гражданину России,
ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экспериментальное исследование турбулентных потоков жидких металлов» по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 06 октября 2016 г., протокол № 129, диссертационным советом Д 004.012.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева 1, утвержденном приказом Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк.

Соискатель Павлинов Александр Михайлович 1990 года рождения, в 2012 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Пермский государственный национальный исследовательский университет (ФГБОУ ВПО ПГНИУ) по специальности «Радиофизика и электроника». С 11.2012 по 10.2016 обучался в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИМСС УрО РАН). Работает младшим научным сотрудником лаборатории Физической гидродинамики ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в лаборатории Физической гидродинамики ИМСС УрО РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Физической гидродинамики ФГБУН ИМСС УрО РАН Фрик Пётр Готлобович.

Официальные оппоненты:

1) Разуванов Никита Георгиевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (г. Москва), ведущий научный сотрудник лаборатории теплообмена в ядерных энергетических установках;

2) Соколов Дмитрий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (г. Москва), профессор кафедры математики физического факультета,
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва), в своем положительном заключении, под-

писанном Яговым Виктором Владимировичем, доктором технических наук, профессором, руководителем научного семинара кафедры Инженерной теплофизики, Свиридовым Валентином Георгиевичем, доктором технических наук, профессором кафедры Инженерной теплофизики, и Краснощековой Татьяной Евгеньевной, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником кафедры Инженерной теплофизики, и утвержденном на заседании научного семинара кафедры Инженерной теплофизики ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», указало, что диссертация А.М. Павлинова является законченной научно-исследовательской работой, посвященной созданию систем измерения температуры, скорости и магнитного поля в турбулентных потоках жидких металлов, генерируемых электромагнитным, механическим и конвективным способами, работающих в условиях высокой температуры, химической активности среды и высокого уровня электромагнитных помех и получению новых экспериментальных данных. Работа обладает научной новизной, несомненной теоретической и практической значимостью, она удовлетворяет всем требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Соискателем опубликовано 49 научных работ, в том числе из них 8 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки. В работах представлены результаты исследования электромагнитных характеристик магнитогидродинамического перемешивателя, экспериментально исследовано влияние перемешивающих течений, генерируемых индуктором бегущего и вращающегося магнитных полей на процесс кристаллизации, доказана возможность восстановления спектров турбулентных пульсаций скорости при измерениях кондукционными датчиками скорости в области индуктора бегущего и вращающегося магнитных полей, экспериментально подтверждено явление вытеснения магнитного поля из объема турбулентного потока проводящей среды (турбулентный диамагнетизм), проведён анализ конвективных течений жидкого натрия в длинном цилиндре, наклоненном по различными углами к горизонту, предложена конструкция комбинированной системы измерения расхода, применимая в условиях развитой турбулентности, высокой температуры и химической активности среды.

Наиболее значительные работы:

1. Халилов Р. И., Павлинов А. М. Генерация электромагнитных сил в цилиндрическом объеме с помощью бегущего и вращающегося магнитных полей // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. N 4-3. С. 1225-1226.
2. Kolesnichenko I., Khalilov R., Khripchenko S., Pavlinov A. MHD stirrer for cylindrical molds of continuous casting machines fabricated aluminium alloy. *Magnetohydrodynamics* 2012. Vol 48. no. 1. P. 221-233.
3. Kolesnichenko I., Pavlinov A., Khalilov R. Movement of the solid-liquid interface in gallium alloy under the action of rotating magnetic field // *Magnetohydrodynamics* 2013. Vol 49. no. 1/2. P. 191-197.
4. Kolesnichenko, I., Pavlinov, A., Golbraikh, E., Frick, P., Kapusta, A., Mikhailovich, B. The study of turbulence in MHD flow generated by rotating and traveling magnetic fields // *Experiments in Fluids*, 2015(56:88)

5. Колесниченко, И. В., Мамыкин, А. Д., Павлинов, А. М., Пахолков, В. В., Рогожкин, С. А., Фрик, П. Г., Халилов, Р. И., Шепелев, С. Ф. Экспериментальное исследование свободной конвекции натрия в длинном цилиндре // Теплоэнергетика, 2015(6), С. 31-39
6. Frick, P., Denisov, S., Noskov, V., Pavlinov, A., Stepanov, R. Magnetic field in a decaying spin-down flow of liquid sodium // Magnetohydrodynamics, 2015, Vol. 51(2), pp. 267-274
7. Frick, P., Khalilov, R., Kolesnichenko, I., Mamykin, A., Pakholkov, V., Pavlinov, A., Rogozhkin, S. Turbulent convective heat transfer in a long cylinder with liquid sodium // Europhysics Letters, IOP Publishing, 2015, Vol. 109, pp. 14002
8. Khalilov R., Kolesnichenko I., Mamykin A., Pavlinov A. A combined liquid sodium flow measurement system // Magnetohydrodynamics 2016. Vol. 52. N 1/2. P. 53–60.

На диссертацию поступили отзывы от ведущей организации и оппонентов.

1) Положительный отзыв ведущей организации утвержден проректором по научной работе ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», д.т.н., профессором В.К.Драгуновым. В отзыве отмечается актуальность темы диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Ведущая организация в отзыве приводит несколько замечаний:

- Во второй главе диссертации утверждается, что измерения положения фронта кристаллизации осуществлялись с помощью девяти ультразвуковых датчиков и упоминается измерение формы границы. Непонятно, почему в описании результатов не приведены полученные эволюции формы фронта.
- В главе, посвящённой исследованию эффекта вытеснения магнитного поля турбулентным течением, показано направление (вдоль оси OZ), вдоль которого осуществлялось измерение индуцированного магнитного поля. Между тем, интерес представляет также распределение поля вдоль радиальной оси (OY). Сам автор замечает, что рост поля может наблюдаться именно в этом направлении, однако измерений проведено не было.

2) Положительный отзыв официального оппонента Н.Г. Разуванова. В отзыве указано, что диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, отмечается большой объём выполненных работ, новизна, научная и практическая значимость.

Оппонент отмечает следующие замечания:

- Автором для измерения локальной скорости в среде жидкого металла используется электромагнитный метод, основанный на применении закона Ома для движущейся среды. В уравнение входит член с плотностью электрического тока, который в общем случае шунтирует полезный сигнал. Понятно, что эти токи трудно учесть, - ими пренебрегают, если они малы, или каким-либо образом компенсируют. В каждом конкретном случае применения автору следовало бы пояснить этот вопрос.
- Для измерения автор использовал датчики авторского исполнения. Описание и вид датчиков представлены кратко — схематично. Было бы полезно дать чертёж и более подробно описать конструкцию: как изготавливался постоянный магнит, электроды, конструкция крепления, электроизоляция, результаты градуировки.
- Геометрические размеры определяют пространственное разрешение датчика скорости и, соответственно, спектральное разрешение турбулентных сигналов. В тексте этот вопрос не обсуждается.

- В исследованиях, представленных в главе 3, обнаружено явление турбулентного диамагнетизма. Возникают вопросы о механизме этого явления, - какова структура турбулентности, и почему магнитное поле вытесняется к стенкам, - генерация турбулентности наиболее интенсивна вблизи стенки, а наибольшее индуцированное магнитное поле обнаружено в центральной части потока.

3) Положительный отзыв официального оппонента Д.Д. Соколова. В нем отмечается высокое качество опубликованных работ, обозначена актуальность, степень новизны полученных результатов, их теоретическая и практическая значимость.

Оппонент приводит следующие замечания:

- В порядке критического замечания скажу, что не понимаю, почему диссертант пишет слово "лоренцевой" с большой буквы.
- В то же время чисто редакционно не все положения сформулированы удачно. Например, методика по измерению чего-либо сама по себе не кажется защищаемым положением. Лучше было бы написать о создании оригинальной методики измерения.
- У меня вызывает некоторые вопросы формат представления публикаций в списке. Дело в том, что в выбранном формате фамилия диссертанта иногда теряется в сокращении "и др." (точнее, в его английском аналоге -- среди публикаций много работ в иностранных журналах). Я понимаю, что это сделано по утвержденным правилам, но от этого не легче. Наверное, лучше изменить правила.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1) Положительный отзыв от д.т.н., главного научного сотрудника Физико-энергетического института имени А.И.Лейпунского Кебадзе Б.В.;

2) Положительный отзыв от д.ф.-м.н., главного научного сотрудника Института Солнечно-Земной Физики Со РАН Кичатинова Л.Л.;

3) Положительный отзыв от к.ф.-м.н., начальника лаборатории МГД-машин АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова» Обухова Д.М.;

4) Положительный отзыв от д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Института Солнечно-Земной Физики Со РАН Пипина В.В.;

5) Положительный отзыв от к.ф.-м.н., заведующего лабораторией физики конденсированных сред ФГБОУ ВПО «Удмуртский государственный университет» Кривилева М.Д..

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- Возможности кондукционных датчиков при исследовании конвективных течений (глава 4) не использованы, хотя при определении составляющих вектора скорости этот метод более надежен в части интерпретации результатов измерений по сравнению с термкорреляционными. Питание соленоидов низкочастотным переменным током в сочетании с синхронным детектированием позволило бы исключить влияние мелкомасштабных пульсаций температуры и термоЭДС между электродами.
- В главе 5 был бы уместен сопоставительный анализ лоренцевой расходомерии с другими методами измерения расхода и определение на его основе области её целесообразного применения.

- В подписи к рис. 1 а) не указан элемент, обозначенный «IV». Подписи к рис. 5 не соответствуют указанным на самом рисунке.
- В автореферате недостаточно материала, чтобы судить о новизне методики измерения скоростей и расходов жидких металлов, выносимой автором на защиту.
- Для описанной в пятой главе системы измерения расхода, основанной на измерении силы Лоренца, представлены результаты тарировки и область применимости в зависимости от значения магнитного числа Рейнольдса. При этом не указан диапазон применимости подобной системы в зависимости от других характерных параметров потока, таких, как параметр МГД-взаимодействия и числа Рейнольдса.

Вместе с тем, в положительных отзывах отмечено, что диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием, представляющим научный и практический интерес, тема работы является актуальной, полученные результаты имеют высокую научную ценность и опубликованы в ведущих мировых научных журналах в области механики жидкости.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются известными ведущими специалистами в области гидродинамики, имеют публикации по данному направлению в рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» хорошо известна своими достижениями в области механики жидкости и газа, в институте активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области гидродинамики.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны методики экспериментов, измерительные системы, программы автоматизации, алгоритмы анализа и обработки экспериментальных данных, позволившие провести исследования турбулентных течений жидких металлов;

предложена система измерения расхода жидкого металла, применимая в условиях развитой турбулентности, высокой температуры и химической активности среды;

доказано явление вытеснения магнитного поля из объема турбулентного потока проводящей жидкости (турбулентный диамагнетизм).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано:

- что на фоне сильных электромагнитных помех, создаваемых индукторами бегущего и вращающегося магнитного поля, возможно восстановление спектров турбулентных пульсаций скорости при адекватном выборе частоты тока индуктора;

- что структура турбулентных течений, генерируемых бегущими и вращающимися магнитными полями, влияет на процесс кристаллизации жидкого металла;

- что линейная зависимость измеряемой силы (в лоренцовых анемометрах) и индуцированных магнитных полей от скорости потока нарушается при магнитных числах Рейнольдса более 4;
- что важное для построения теории динамо явление турбулентного диамагнетизма можно уверенно зафиксировать в лабораторном эксперименте с потоком жидкого натрия.

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

использованы современные экспериментальные методы исследования локальных и крупномасштабных характеристик турбулентных течений жидких металлов;

изложены новые результаты, касающиеся поведения магнитного поля в турбулентных потоках жидких металлов, а также возможности восстановления характеристик турбулентного потока по измеренным пульсациям магнитного поля;

раскрыты особенности применения метода лоренцевой анемометрии при умеренных значениях магнитного числа Рейнольдса (~ 1);

изучено влияние течений, создаваемых индуктором магнитогидродинамического перемешивателя, на процесс кристаллизации;

проведена модернизация существующих экспериментальных установок и методик измерений, что обеспечило получение новых результатов по теме диссертации.

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

разработаны системы измерения скорости, магнитного поля и температуры в турбулентных потоках жидких металлов, генерируемых электромагнитным, механическим и конвективным способами, работающие в условиях высокой температуры, химической активности среды и высокого уровня электромагнитных помех;

определены границы практической применимости метода лоренцевой анемометрии к высокоскоростным турбулентным течениям жидких металлов;

созданы расходомеры жидкого металла, основанные на трёх различных методах измерения скорости; эти устройства использованы для экспериментальных исследований смешения разнотемпературных потоков жидкого натрия в составе натриевого контура Института механики сплошных сред УрО РАН;

представлены результаты лабораторного исследования электромагнитных характеристик магнитогидродинамического перемешивателя и создаваемых им турбулентных течений жидкого металла.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

экспериментальные результаты получены с помощью различных (электромагнитных, ультразвуковых, корреляционных) методов измерения скорости жидких металлов; температурные измерения проводились при помощи калиброванных термопар;

теория основана на известных уравнениях магнитной гидродинамики;

идеи базируются на обобщении имеющегося опыта теплофизических и электромагнитных измерений в жидких металлах;

использованы современные экспериментальные методики и программные комплексы для обработки полученных данных;

установлено качественное и количественное соответствие результатов диссертации результатам, представленным в независимых источниках; продемонстрирована внутренняя непротиворечивость результатов.

Личный вклад соискателя состоит в разработке и изготовлении систем измерения, разработке программного обеспечения для автоматизации экспериментальных исследований. Соискатель принимал личное участие в сборке и модернизации всех экспериментальных установок, в анализе и обработке результатов исследований и их сравнении с теоретическими и экспериментальными данными других авторов; участвовал в написании статей и подготовке докладов на конференциях. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием плана исследований, обладающего понятной внутренней логикой; постановкой проблем сначала в общей форме, а затем расщеплением их на последовательность частных задач.

На заседании 8 декабря 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Павлинову А.М. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель
диссертационного совета



/Матveenко Валерий Павлович

Ученый секретарь
диссертационного совета

/Зуев Андрей Леонидович

8.12.2016 г.