

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Разуванова Никиты Георгиевича

на диссертацию Павлинова Александра Михайловича

«Экспериментальное исследование турбулентных потоков жидких металлов»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы.

### **Актуальность темы диссертации.**

Жидкие металлы (ЖМ), как теплоносители и рабочие среды, находят все более широкое применение в различных областях науки и техники, а также в перспективной энергетике. Особенности ЖМ сред требуют изучения магнитной гидродинамики и конвективного теплообмена потоков в каналах различных устройств. Тема работы имеет отношение к металлургии, - управлению процессом выплавки, к построению моделей космологических явлений, происходящих в недрах звезд и планет, изучению термогравитационной конвекции жидкого натрия, что имеет место в реакторах быстрых нейтронах. Задачи исследования требуют разработки методик и проведения измерений различных характеристик ЖМ турбулентных потоков в сложных условиях эксперимента. В связи с этим тема диссертации является весьма актуальной.

### **Анализ содержания диссертации.**

В **введении** обоснована актуальность задач экспериментального исследования турбулентных потоков жидких металлов. Сформулированы цели работы, показана научная новизна и практическая ценность.

В **первой главе** автором представлен аналитический обзор методов экспериментального исследования в турбулентных потоках ЖМ. Отмечается сложность и неординарность задачи измерения характеристик течения. Оказывается, что большинство методов измерения локальной скорости и расходов, использующихся в традиционных средах (вода, газ), совершенно неприменимы в среде жидкого металла. Связано это с рядом отличительных свойств и особенностей ЖМ. А именно - высокая электропроводность, которая приводит к появлению сильных электромагнитных наводок, помех, шумов в датчиках и измерительных цепях. Высокая теплопроводность и неизотермичность среды искажает градуировки чувствительных датчиков, приводит к появлению термо-эдс. За редким исключением, - это высокая температура плавления, а также агрессивность среды, обусловленная, как физическими явлениями, так и химической активностью, которая возрастает с ростом температуры ЖМ. Непрозрачность среды исключает оптические методы и визуализацию течений. Все это ограничивает выбор и использование различных методов и датчиков для экспериментального исследования, а также усложняет проведение измерений.

Основная проблема заключается в измерениях локальной скорости потока. Наиболее перспективным оказывается кондукционный датчик, принцип действия которого следует из закона Ома для движущейся среды.

Во **второй главе** исследуется МГД устройство, предназначенное для перемешивания расплава. Для этого автором проведены локальные измерения компонент индукции магнитного поля. Используемая автором автоматическая система перемещения датчиков позволила получить детальную картину распределения индукции МП в зоне перемешивания.

Отдельно проведена серия опытов на цилиндрах из алюминия по определению интегральных силовых характеристик магнитного перемешивателя.

Для локальных измерений скорости непосредственно в среде модельной жидкости (галлиевом сплаве) использовался кондукционный датчик авторского исполнения. С помощью датчика получены профили усредненной скорости.

Проведены измерения пульсационной скорости и получены спектры турбулентных сигналов. Выделение полезного сигнала осложняется наложением сильных наводок от

электромагнитных полей установки. Для фильтрации сигнала автор применяет математический аппарат статистической обработки на основе вейвлет-анализа.

Автором проведены измерения положения фронта кристаллизации в емкости перемешивателя на модельном сплаве с использованием ультразвуковых датчиков. Форма полученных сигналов не позволяет однозначно определить положение границы раздела фаз. Применение автором вейвлет-анализа позволило определить ее с хорошей точностью. Графики результатов измерений показывают замедление процесса кристаллизации по действием перемешивающих потоков.

В каждой серии различного рода измерений собиралась измерительная система, состоящая из современного скоростного высокоточного измерительного оборудования (АЦП), усилителей, фильтров. Работа с электроникой требует высокой инженерной квалификации и навыков программирования.

В третьей главе диссертации представлен стенд, на котором исследуется тороидальное течение натрия в магнитном поле. Целью эксперимента являлось исследование генерации магнитного поля, индуцированного турбулентностью.

Необходимо отметить исключительную сложность эксперимента. Во-первых, рабочей средой является натрий, который требует особых мер безопасности. Вследствие высокой химической активности и токсичности исключается контакт с водой и воздухом.

Во вторых, измерения проводились в камере, вращающейся с довольно большой скоростью. Необходимо было закрепить датчики внутри камеры, вывести измерительные, питающие и управляющие провода, разместить первичные измерительную аппаратуру на оси вращения, подключить к системе измерений посредством блока скользящих контактов.

Исследования проводились в нестационарном режиме: одновременно измерялись компоненты индукции магнитного поля датчиком холла и скорости кондукционным датчиком.

Несмотря на малые величины магнитных полей (несколько Гауссов), получены надежные данные по эволюциям индукции магнитного поля в потоке, компонент скорости вблизи стенки, позволяющим судить о структуре турбулентности и индуцированных ими магнитных полях.

Делается вывод о наблюдаемом явлении турбулентного диамагнетизма, выраженном в ослаблении тороидального магнитного поля в центральной части и вытеснении его к стенкам канала.

В четвертой главе диссертации описан стенд для исследования термогравитационной конвекции в длинном цилиндре в нагревом и охлаждении торцов. Рабочей средой также является натрий.

Впечатляет большое количество датчиков, смонтированных внутри камеры, на теплообменных поверхностях и в цилиндрической стенке рабочей камеры. Используя массив термопар, проведены исследования распределений температуры, скоростей, коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) в горизонтальном, вертикальном и наклонном цилиндрах.

Отмечается невозможность измерения скорости кондукционными датчиками, ввиду наложения сильной термо-ЭДС, сравнимой с полезным сигналом. Тем не менее, измерения скорости выполнены корреляционным методом по сигналам термопар, заложенных в поток через стенку.

Полученные результаты позволили сделать выводы интенсивности конвекции и соответственно теплоотдаче в зависимости от ориентации канала.

Пятая глава посвящена датчикам по измерению расхода. Представлена конструкция, описание расходомера, предназначенного для определения средней скорости или расхода жидкого металла в трубах и каналах натриевых стендов.

Особенность расходомера состоит в конструктивном исполнении в виде системы из трех устройств. Таким образом, расход можно было измерить тремя разными методами: кондукционным, индукционным и термокорреляционным.

Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками, так что они (методы) дополняют друг друга. Представлены результаты градуировки каждым методом. Проанализированы погрешность, диапазон и точность измерений скоростных потоков проводящих сред с магнитными числами Рейнольдса больше 1. В целом применение комбинированной системы повышает точность и надежность измерения расхода.

В той же главе дается описание датчика скорости, основанного на измерении силы Лоренца, а также датчика по измерению индуцированного магнитного поля.

Достоинство этой части работы, что эти датчики самостоятельно изготовлены автором, смонтированы на установке, описанной в главе 3. Проведены измерения и представлены графики зависимости измеренных величин от скорости течения. Определен диапазон скоростей, где зависимость линейна.

**Новизна и научная значимость** определяется разработанными методиками измерений характеристик гидродинамики и теплообмена в потоках жидкого металла под действием массовых сил различной природы и результатами, полученными с их применением на экспериментальных стендах в исследованиях:

- 1) Структуры турбулентных течений при наложении бегущего и врачающегося поля и их влияние на процесс кристаллизации расплава металла;
- 2) Индуцированных магнитных полей в потоке жидкого натрия в тороидальном канале в обнаруженном явлении турбулентного диамагнетизма;
- 3) Теплообмена под действием свободной конвекции натрия в длинном цилиндрическом канале;
- 4) Новых методов измерения расхода в потоках жидкого натрия.

**Практическая ценность** заключается в следующем:

- 1) Отработаны новые методы измерений с использованием датчиков скорости, локальных и средних, и аппаратных средств в потоках жидких металлов, которые могут использоваться, как в лабораторных, так и в промышленных установках;
- 2) Полученные опытные результаты предполагается использовать для разработки МГД-перемешивателей жидкого металла, предназначенных для улучшений технологий выплавки цветных металлов.
- 3) Данные по конвективному теплообмену натрия в длинном цилиндре использованы для верификации кодов, применяемых для проектирования контуров охлаждения реакторов на быстрых нейтронах;

**Обоснованность и достоверность научных положений выводов и рекомендаций** определяется выбором и проработкой методик измерения, основанных на законах электромагнитной динамики движения сплошной среды; использованием современной скоростной и высокоточной измерительной аппаратуры и программных средств; применением математических статистических методов вторичной обработки сигналов; градуировкой первичных преобразователей и оценкой погрешностей; сравнением экспериментальных данных с расчетными в результате численного моделирования.

Основные результаты опубликованы в большом количестве статей, из которых 8 в журналах из списка ВАК, а также WEB OF SCIENCE и SCOPUS. Результаты работы неоднократно представлялись на конференциях отечественного и международного уровня.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

В целом работа выполнена на высоком научном уровне.

Необходимо отметить большой объем выполненных автором работ по подготовке и проведению экспериментальных исследований и обработке и представлению результатов.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1 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 пояснить этот вопрос.

2 Для измерения автор использовал датчики авторского исполнения. Описание и вид датчиков представлены кратко - схематично. Было бы полезно дать чертеж и более подробно описать конструкцию: как изготавливается постоянный магнит, электроды, конструкция крепления, электроизоляция, результаты градуировки.

3 Геометрические размеры определяют пространственное разрешение датчика скорости и, соответственно, спектральное разрешение турбулентных сигналов. В тексте это вопрос не обсуждается.

4 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.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Заключение по работе.**

Анализ, представленных для отзыва материалов позволяет заключить, что диссертационная работа, выполненная Павлиновым А.М., является законченной научно-квалификационной работой, в которой решен целый ряд задач по экспериментальному исследованию потоков жидких металлов

Считаю, что работа соответствует пункту 9 положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, Павлинов А. М., заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент Разуванов Никита Георгиевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории № 2.1.2.2, - теплообмена в ядерных энергетических установках, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).  
Москва, 127412, Ижорская 13/19, тел. +7-495-361-16-73, [nikita.razuvanov@mail.ru](mailto:nikita.razuvanov@mail.ru).

Дата 8.11.2016

Разуванов

Разуванов Никита Георгиевич

Подпись д.т.н., в.н.с. ОИВТ РАН Разуванова Никиты Георгиевича удостоверяю.

Ученый секретарь ОИВТ РАН, д.ф.м.н.



Амиров Равиль Хабибулович