

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Колесниченко Ильи Владимировича «Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность работы

Жидкие металлы в качестве теплоносителей и рабочих тел широко используются в металлургии, энергетике, машиностроении. Технологические процессы с участием этих материалов протекают, в основном, при высоких температурах и характеризуются неблагоприятным воздействием на окружающую среду и оборудование. Управление подобными процессами (например, перекачка, перемешивание и плавка металлов), обычно, осуществляется бесконтактными методами с помощью специального оборудования, основанного на силовом воздействии электромагнитных полей различных конфигураций на объем жидкого металла. Повышение эффективности работы подобного оборудования невозможно без всестороннего изучения протекающих в них магнитогидродинамических процессов, которые, несмотря на многолетнюю историю, исследованы недостаточно полно. В частности, подобные исследования важны для создания более совершенных конструкций и конечных продуктов плавильных агрегатов в металлургической промышленности. В настоящее время чрезвычайно актуальна задача об обеспечении надежной и безопасной эксплуатации жидкометаллических батарей, стабильная эксплуатация которых определяется гидродинамическими особенностями электровихревых течений (ЭВТ), инициированных неоднородным электрическим током. В атомной энергетике в качестве теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах используется жидкий металл – натрий. Как показала практика, при смешивании горячих конвективных потоков этого металла могут генерироваться вихревые структуры, вызывающие значительные циклические пульсации температуры. Подобные пульсации могут привести к тяжелой аварии на АЭС вследствие разрушения стенки канала. Помимо практической важности, исследование жидкометаллических МГД течений представляет фундаментальный интерес для развития как обычной, так и магнитной гидродинамики. Например, изучение особенностей генерации и взаимодействия крупномасштабных вихревых МГД структур могут быть использованы для прояснения свойств аномальной двумерной турбулентности. Большинство из перечисленных выше вопросов с разной степенью проработки рассматриваются в диссертации И.В. Колесниченко, что подтверждает существенную важность и актуальность темы проведенного исследования.

Научная новизна положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации

В рамках диссертационной работы автором было разработано множество (более десятка!) экспериментальных установок, усовершенствованы методики измерения скорости в турбулентных жидкометаллических потоках и получен целый ряд оригинальных, новых экспериментальных и расчетных результатов, среди которых по своей научной и научно-технической значимости можно выделить следующие:

1. Результаты экспериментальных и расчетных исследований подтвердили и успешно развили предположение о механизме подавления полоидального течения во внешнем магнитном поле посредством возникновения азимутальной закрутки ЭВТ. Впервые численными методами показано, что в полностью осесимметричной постановке задачи и отсутствии внешних магнитных полей возможно возникновение пульсаций азимутальной скорости из-за колебательного разнонаправленного характера ее вращения.
2. На основе показаний кондукционного анемометра с собственным магнитным полем и датчиков магнитного поля с привлечением кросс-корреляционного вейвлет-анализа впервые оценены интенсивность и спектр турбулентных пульсаций скорости электровихревых течений, созданных бегущими или вращающимися магнитными полями.
3. С помощью экспериментальных и расчетных методов исследования показано, что совместное применение бегущего и вращающегося магнитных полей приводит к существенной интенсификации процесса перемешивания расплавов и улучшению металлографической структуры их слитков.
4. Детально экспериментально изучены гидродинамика и конвективный теплообмен в цилиндрических контейнерах, заполненных жидким натрием. Контейнеры имели различную относительную длину (отношение высоты к диаметру цилиндра) и располагались под разными углами наклона к горизонту. Обнаружен режим интенсивных колебаний крупномасштабной конвективной циркуляции. Получены зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена в цилиндрических каналах с различным аспектным соотношением от угла их наклона относительно вертикали и осевого перепада температуры.
6. Проведены оригинальные экспериментальные исследования крупномасштабных пульсаций потока в следе за магнитным препятствием. На основе полученных результатов предложена новая методика контроля электропроводности рабочей жидкости.
7. Впервые получена экспериментальная информация по характеристикам процесса смещения двух разнотемпературных перпендикулярно пересекающихся потоков натрия.

Теоретическая значимость работы заключается в важности умозаключений и обобщений, выработанных автором при анализе результатов достоверного, подтвержденного численными расчетами нового экспериментального материала. В первую очередь это касается вопросов возникновения и развития крупномасштабных МГД течений жидкого металла в замкнутых объемах, а также их влияния на процессы кристаллизации, теплопереноса и генерации перепада давления. Полученные результаты существенно развивают гидродинамические аспекты теории взаимодействия электромагнитных полей с жидкими металлами и сплавами; способствуют более глубокому пониманию тепломассообменных процессов в средах с низкими числом Прандтля. Разработанные в диссертационной работе измерительные методики вносят значительный вклад в развитие теории гидродинамического эксперимента.

Практическая значимость и ценность работы; реализация ее результатов

В диссертационной работе выполнен целый ряд практически важных исследований, результаты которых либо уже внедрены, либо готовы к внедрению в промышленность. В частности:

- Разработаны и созданы новые высокотемпературные электромагнитные насосы, перемешиватели, расходомеры, готовые для применения на предприятиях металлургической и атомной промышленности;
- Создан уникальный жидкометаллический натриевый стенд, который используется для проведения прямо-сдаточных испытаний аппаратов для атомных станций;
- Создан готовый к внедрению в промышленность оригинальный разборный индуктор с чередующимися по направлению вращения магнитными полями;
- Результаты исследований конвективного теплообмена в цилиндрических емкостях и трубах, были использованы для верификации расчетных кодов при проектировании новых АЭС, в которых в качестве теплоносителя используется жидкий натрий.

Степень обоснованности и достоверности положений, выводов и заключений, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается применением в опытах высокоточной измерительной аппаратуры, использованием в расчетных исследованиях известных и надежных коммерческих кодов, удовлетворительным соответствием результатов численных и экспериментальных исследований.

Оценка структуры и содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 345 страниц с 232 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 336 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены результаты экспериментально-расчетных исследований крупномасштабных электровихревых течений в цилиндрических контейнерах с локальным подводом постоянного электрического тока. Представлен краткий обзор литературы по изучению ЭВТ подобного типа; описаны особенности их возникновения и развития как в условиях отсутствия влияния внешнего магнитного поля, так и при его воздействии на вихревую структуру исследуемых потоков.

Во второй главе представлены экспериментальные и расчетные данные по гидродинамической структуре течений, образующихся в заполненных жидким металлом цилиндрических контейнерах под действием бегущего и вращающегося магнитного поля. Описаны задачи исследований, решение которых основывается на применении методов физического и численного моделирования. Детально рассмотрен вопрос о генерации вихревых течений, вызванных отдельным и совместным действием бегущих и вращающихся магнитных полей. Описана конструкция индуктора нового типа, основанного на силовом воздействии на жидкий металл вращающихся магнитных полей с чередованием направления вращения. Отдельный параграф посвящен методике измерения степени турбулентности вихревых течений в условиях сильного электромагнитного поля.

В третьей главе описаны результаты комплексных экспериментально-расчетных исследований влияния вихревых течений, сгенерированных внешними магнитными

полями, на процесс кристаллизации жидких металлов и сплавов. В обзорном параграфе кратко проанализированы работы по влиянию различных типов внешних магнитных полей на темп кристаллизации и кристаллическую структуру затвердевающих расплавов. Основная часть главы посвящена изучению вопроса об особенностях влияния течений, вызванных действием локализованных, бегущих и вращающихся магнитных полей на направленную кристаллизацию в плоских слоях, а также на темп кристаллизации в цилиндрическом контейнере. Детально описано исследование влияния течений, вызванных раздельным и совместным действием бегущих и вращающихся полей, на процесс кристаллизации и металлографическую структуру цилиндрических алюминиевых слитков.

В четвертой главе изложены результаты исследований конвективного теплообмена в цилиндрических ячейках, заполненных жидким натрием. Опыты выполнены при различных углах наклона оси цилиндра относительно силы тяжести и разных значениях отношения его высоты и диаметра. Описаны конструкции экспериментальных установок со специально разработанными теплообменниками, которые обеспечили однородные граничные температурные условия на торцах конвективной ячейки. Представлены результаты исследования эволюции крупномасштабной циркуляции в коротких (размер высоты равен диаметру) и длинных цилиндрах. На основе анализа колебаний крупномасштабной конвективной циркуляции выявлена причина зависимости теплообмена натрия от относительной длины рабочих контейнеров.

Пятая глава посвящена экспериментально-расчетному исследованию особенностей процессов генерации и взаимодействия вихревых и транзитных течений в цилиндрических каналах. Обоснована необходимость детального изучения подобных процессов. Описаны конструкции разработанного электромагнитного насоса и созданных экспериментальных установок, в том числе большого двухконтурного натриевого стенда. Приведены результаты исследований крупномасштабных вихревых структур, образующихся в следе за магнитным препятствием, а также опытные данные по взаимодействию вихревых и транзитных течений при смещении двух разнотемпературных потоков жидкого натрия в тройниковом соединении.

В Заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Апробация работы и подтверждение опубликования основных положений и результатов

Основные положения и результаты работы обсуждались на 28 научных Российских и международных конференциях/семинарах. По материалам диссертации опубликовано 85 печатных работ, в том числе 30 статей (включая 12 работ из списка двух высших квартилей), попадающие под требования Научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Основные замечания по работе

1. Нельзя полностью согласиться с утверждением, что «Впервые объяснены причины потери интенсивности крупномасштабного полоидального течения во внешнем

магнитном, а также экспериментально получены характеристики этого течения». Предположение о подавлении интенсивности полоидального течения тороидальным вихрем, который направлен против ЭВТ и сгенерирован азимутальным вращением расплава, было описано ранее в работах Э.В. Щербинина. (Электровихревые течения, Рига: Зинатне, 1985).

2. В диссертации при исследовании параметров турбулентности жидкометаллических МГД потоков применяется интересный и оригинальный метод, основанный на совместном использовании кондукционного анемометра (с собственным магнитным полем) и датчика магнитного поля Холла, который расположен вне расплавленного металла на большом (~100 мм) расстоянии от датчика скорости. Для обработки измеренных пульсаций используется вейвлет-анализ. Оценивались ли погрешность результатов проведенных опытов, полученных с помощью данной методики в условиях очень сложного течения *токонесущей* жидкости? Какой измерительный объем кондукционного анемометра, применяемого в опытах?

3. Результаты использования ультразвукового доплеровского анемометра, применяемого в нескольких разделах диссертации для измерения осредненной скорости МГД течений, в существенной степени зависят от распределения отражающих частиц (окислов), растворенных в металле. Вопрос о количестве этих частиц и равномерности их распределения по объему, в диссертации, к сожалению, не обсуждается.

4. В диссертации практически отсутствует графический материал, посвященный сравнению полученных результатов диссертации с данными других авторов.

5. На рис. 1.39 диссертации приведен график зависимости кинетической энергии течения от внешнего магнитного поля, изменяющегося в диапазоне 10^{-6} - 10^{-1} Тл. Расчеты выполнены при токе $I=100$ А в условиях электродинамического приближения. Вместе с тем, в работе [Magnetohydrodynamics. 2019. 55. 4, 455 - 464] показано, что начиная с внешнего магнитного поля 0.01 Тл становится значимым влияние электромагнитного торможения, особенно при малых токах (100 А можно считать малым током). В этих условиях применение электродинамического приближения становится неприемлемым. Поэтому, можно предположить, что результаты, представленные на рис.1.39 не совсем достоверны.

Следует также отметить некоторые редакторские недоработки, затрудняющие чтение текста диссертации. Например:

- отсутствует список используемых обозначений;
- встречаются непонятные англицизмы и аббревиатуры, например, «errorбар», TMF, RMF;

Общее заключение о работе

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа Колесниченко Ильи Владимировича "Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений", представляет собой оригинальную и завершенную научно-квалификационную работу, посвященную изучению генерации и взаимодействию крупномасштабных вихревых структур, образующихся в объемах жидких металлов в условиях воздействия электромагнитных полей и сил плавучести. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение, имеющее существенное значение в области механики жидкости, газа и плазмы.

Диссертация Колесниченко Ильи Владимировича по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, степени обоснованности результатов и их научно-практической значимости полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в ред. от 18.03.2023 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и соответствуют специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы. Автор диссертации Колесниченко Илья Владимирович достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Я, Ю.П. Ивочкин, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теплообмена в энергетических установках, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), доктор технических наук

Ивочкин Юрий Петрович

26 сентября 2024

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, строение 2, ОИВТ РАН.

<https://www.jiht.ru/>
тел. +7(495)361-16-73
e-mail: ivochkin@yandex.ac.ru

Подпись Ю.П. Ивочкина заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН
д.ф.-м.н

Киверин А.Д.

