

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

КРИВИЛЕВА МИХАИЛА ДМИТРИЕВИЧА

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

Энергетика является наукоемкой областью промышленности, поскольку требует создания новых и совершенствования существующих технологий машиностроения, снижения затрат на выработку электроэнергии, повышения надежности узлов. В этой области процессы переноса в целом и задачи прикладной гидродинамики в частности лежат в основе большинства технических процессов. В связи с этим важной научной проблемой является проведение комплексных (экспериментальных и численных) исследований для описания режимов работы механизмов, эксплуатирующихся в условиях значительного теплового нагружения и протекающих фазовых переходов. Развивающиеся в последние десятилетия многоуровневые и мультифизические математические модели позволяют с использованием численных методов существенно уточнить описание технологических процессов за счет явного учета важнейших механизмов переноса и деформирования.

Диссертационная работа И.В. Колесниченко посвящена развитию комплексного описания гидродинамических процессов и кристаллизации при воздействии магнитным полем различной модуляции. Предложенный подход обладает универсальностью и применим для описания различных технологических процессов, как показано в диссертации. Развитый в работе новый метод позволил качественно и количественно изучить формирование и динамику развития вихревых течений в каналах различной геометрии. Впервые полностью решена и детально проанализирована задача возникновения температурных пульсаций в канале при смешении горячего и холодного потоков. Учитывая высокую неустойчивость этого явления и его значительное негативное влияние на работу магнитогидродинамических насосов, соискателю

удалось получить новые и оригинальные данные, прогнозирующие поведение расплавленных металлов в таких системах.

Учитывая использование магнитогидродинамических насосов в атомной энергетике, практическое использование результатов диссертационного исследования привело к качественному улучшению методики проектирования этих механизмов, когда режим работы и геометрия канала разрабатываются с учетом возвратных течений и низкочастотных пульсаций, потенциально способных привести к разрушению контура насоса.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, который содержит 336 наименований. Объем работы – 345 страниц.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, приведена научная новизна, указана практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена изучению вихревых течений в цилиндрических ячейках с учетом особенностей подвода электрического тока. Исследование направлено на описание возникновения вихревых течений. Для исследований сконструирована и испытана экспериментальная установка, обеспечивающая контроль скоростей течения жидкого расплава в условиях воздействия магнитным полем. Применена ультразвуковая доплеровская анемометрия, которая обеспечила устойчивое воспроизведение и анализ сигналов датчиков. При этом в разработке установки использовано несколько оригинальных технических решений. Скрупулезно отработана методика эксперимента, проведена сложная юстировка измерительной аппаратуры.

Далее комплексно – экспериментально и численно – проанализированы структура и интенсивность электровихревого течения при различном уровне внешнего магнитного поля. Установлено влияние дополнительных факторов, связанных с геометрией катодов. В итоге предложены способы управления и подавления развитого полоидального потока за счет магнитного поля, учитывающие все геометрические, электромагнитные и ориентационные характеристики системы.

Во второй главе проведено развитие подходов, развитых ранее в работах Т.П. Любимовой и других авторов, к описанию воздействия бегущих и вращающихся полей на электропроводящую среду. Для этого сформулирована и численно исследована замкнутая система уравнений МГД, которая использована далее для экспериментального изучения течений в ячейке с жидким металлическим расплавом. Скорость потока измерялась с помощью кондукционных датчиков скорости. Система индукторов, управляемых независимо, позволила воспроизвести экспериментально различные виды модуляции (бегущую и вращающуюся), а также их суперпозицию.

Интересным результатом является отсутствие зависимости отношений кинетической энергии азимутального и полоидального течений от силового параметра. При этом силовой параметр оказывает существенное влияние на отношение пульсаций энергии. Исследованы нестационарные процессы разгона течения при различных значениях числа Тейлора. Определено его критическое значение, которое приводит к существенному усложнению вихревой структуры течения. На основании проведенных исследований И.В. Колесниченко предложена усовершенствованная конструкция индуктора с чередованием направления вращающихся магнитных полей по высоте.

В третьей главе изучается влияние течений на процесс кристаллизации жидких металлов и сплавов. Воздействие электромагнитным полем широко используется в технологии непрерывной разливки стали, поэтому данная задача имеет практическое значение для широкого круга производств. Соискателем выполнена объемная работа по описанию влияния течений, вызванных действием локализованных и бегущих полей, на направленную кристаллизацию.

Экспериментально изучена динамика движения фронта кристаллизации при различных режимах магнитного воздействия. Отмечено изменение геометрии фронта кристаллизации для бегущего и вращающегося магнитного поля. Для Al сплава изучено влияние скорости конвективного потока на особенности формирования микроструктуры, когда регистрируется переход от развитой дендритной структуры к фрагментированной структуре. Получены новые количественные данные по зависимости относительной доли эвтектики в структуре сплава АК9ч от силового параметра.

В четвертой главе анализируется проблема эволюции крупномасштабной циркуляции и конвективного теплообмена в наклонных цилиндрических ячейках. Для этого сконструированы экспериментальные ячейки с различным аспектным соотношением для оценки числа Нуссельта в теплообменном аппарате с изменяемой разницей температур между нагревателем и холодильником. Эффективность перемешивания в теплообменнике оценивали двумя параметрами, соответствующими разнице средних температур и интенсивности флуктуаций температуры.

В результате испытаний предложена новая зависимость числа Нуссельта от угла поворота ячейки, которая носит существенно немонотонный характер. Полученные результаты аргументированно описаны на основе анализа гидродинамических процессов. В результате получены зависимости числа Нуссельта от числа Рейля, показан их универсальный характер, даны практические рекомендации по расчету теплопереноса в ячейках с различной ориентацией в поле Земли.

В пятой главе решена крупная магнитогидродинамическая задача по генерации и взаимодействию вихревых и транзитных течений в цилиндрических каналах. Актуальность этой проблемы обусловлена наличием каналов сложной геометрии с присутствием стыковочных узлов в системах теплообмена, используемых для охлаждения энергетических установок. В работе критически проанализированы особенности возникающих МГД течений, предложен новый подход к их описанию, заключающийся в комплексном изучении, включающем размерный анализ и активное МГД моделирование.

В результате проведенных работ получена одна из наиболее важных эксплуатационных характеристик – зависимость перепада давления в магнитогидродинамическом насосе от объемного расхода и модулирующей частоты магнитного поля. Эти сведения активно расширяют инженерные основы проектирования МГД насосов и были применены для производства МГД устройств по заказу промышленного заказчика.

Научная ценность полученных в работе данных и сделанных на их основе выводов состоит в их важности для разработки теплообменных и перекачивающих устройств в области промышленной энергетики. Предложенный в диссертации комплексный подход успешно применен при разработке контуров охлаждения энергетических установок на жидком натрии. Практическая ценность заключается в том, что разработанные модели и промышленные образцы успешно внедрены на промышленных предприятиях реального сектора экономики РФ.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается удовлетворительным согласием расчетных и экспериментальных данных. Обоснованность положений и выводов, сделанных на основе проведенных исследований, обеспечивается их непротиворечивостью имеющимся литературным данным и современным научным представлениям. Основные результаты диссертации опубликованы в 30 печатных работах в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования, и журналах из списка ВАК. Результаты докладывались и обсуждались на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня.

При прочтении диссертации отмечены **следующие сильные стороны** диссертационной работы:

1. Изучен большой спектр актуальных научных проблем, все из которых имеют практическую значимость. Пять исследованных задач решены с использованием комплексного подхода, включающего как полномасштабный лабораторный эксперимент, так и численное моделирование. В каждой задаче достигнуто хорошее согласие эксперимента и расчетных данных, что свидетельствует о правильном выборе постановок задач и методик исследований.
2. С использованием передовых методов исследованы спектры изотропной и пристеночной турбулентности, установлена взаимосвязь с формированием пограничных слоев, описано влияние геометрических факторов в замкнутых ячейках. Проведено сопоставление с доступными литературными данными, особенно в области малых и сверхмалых частот флуктуаций, изучение которых наиболее затруднено.

3. Во всех главах выполнено обобщающее обсуждение гидродинамических и физических механизмов протекающих явлений. Критически проанализированы полученные зависимости параметров между собой. Полученные результаты сведены к универсальным зависимостям для безразмерных характеристических чисел.

При прочтении диссертации возникли **следующие замечания:**

1. При изучении в разделе 1.2.5 вихревых течений, пульсаций скорости и температуры, регистрируемых датчиками, применен вейвлет-анализ. Использование локализованной базисной функции (вейвлета) существенно повышает точность спектрального анализа сигналов с ограниченной длиной. Тем не менее, в работе не приведены данные по чувствительности спектра к длине выборки. Представляется, что для частот $\nu < 0.05$ Гц выборки длиной 300 с находятся на пределе применимости метода.
2. В разделе 3.2.2 для аппроксимации эволюции положения границы раздела фаз предложено использовать закон квадратного корня $x \sim \sqrt{t}$, который широко применяется при решении задач кристаллизации слитка, когда теплоотвод включает теплофизическое влияние изложницы. В проведенном лабораторном эксперименте четко регистрируется (рисунок 3.8) линейная зависимость $x \sim t$. Закон квадратного корня для задачи с охлаждаемой подложкой неприменим, зависимость должна быть квазилинейной.
3. В части описания влияния силового фактора F_0 на параметры микроструктуры получена убедительная зависимость доли эвтектических фрагментов (рисунок 3.42а). При этом анализ размеров фрагментов твердого раствора выглядит неестественным и избыточным, поскольку незначительно меняется как функция от F_0 .

Отмеченные недочеты не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. В целом диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно. В диссертации приведены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение серии актуальных научных задач, имеющих существенное значение для развития подходов и

методов магнитной гидродинамики, в частности – в области конструирования и развития оборудования для энергетики. Текст автореферата и диссертации, а также выполненные публикации полностью отражают суть работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Диссертационная работа соответствует требованиям п.9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и от 12.10.18 № 1168), а ее автор Колесниченко Илья Владимирович достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, тел. раб. 8 (3412) 916-230, эл. почта mk@udsu.ru

Кривилев Михаил Дмитриевич

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Колесниченко Ильи Владимировича, и их дальнейшую обработку.

М.Д. Кривилев

Подпись официального оппонента заверяю

01.10.2024

дата

подпись

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»



Л.А. Пушина