Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Исаева Сергея Александровича 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 диссертационной работы. Актуальность темы исследования обусловлена как развитием фундаментальных знаний о поведении магнитогидродинамических и конвективных течений жидкого металла, так и практическими задачами металлургической и энергетической промышленности по совершенствованию существующих и созданию новых технологий. В работе исследуются гидродинамические и термодинамические процессы в жидких металлах. Они происходят при нелинейных взаимодействиях между электромагнитными и температурными полями, и созданными ими вихревыми течениями. Интенсивные течения расплавленных металлов генерируются сильными электромагнитными полями или большими перепадами температуры. Работа согласуется с Перечнем основных направлений технологической модернизации РФ (1. Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива). Проблематика диссертации находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники РФ (8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика) и связана с разработкой критических технологий РФ (9. Технологии атомной энергетики, ядерного топливного цикла, безопасного обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом; 26. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии). Следует отметить, что исследования поддержаны грантами РФФИ и РНФ, а сама работа выполнена в пользующейся мировой известностью научной школе профессора Фрика П.Г. Таким образом, представленную диссертацию можно признать актуальной.

Научная новизна работы несомненна. Она имеет фундаментальное значение.

1.Впервые объяснены причины потери интенсивности крупномасштабного полоидального течения во внешнем магнитном поле, а также экспериментально получены характеристики этого течения.

2.Впервые показана возможность определения с помощью кросс-корреляционного вейвлет-анализа достоверной части турбулентных спектров течений, созданных бегущими или вращающимися магнитными полями, а также возможность создания развитого в объеме ячейки течения путем чередования направления вращающегося поля по высоте.

3.Впервые в эксперименте показано, что использование совокупности бегущего и вращающегося магнитных полей существенно улучшает и гомогенизирует распределение свойств цилиндрических слитков, а управление характеристиками полей позволяет влиять на поведение границы твердой и жидкой фазы.

4.Впервые обнаружено наличие интенсивных колебаний крупномасштабной конвективной циркуляции в коротком канале при углах наклона его оси относительно вертикали вплоть до 40 градусов.

5.Впервые экспериментально получены зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена в цилиндрических каналах с различным аспектным соотношением от угла их наклона относительно вертикали и осевого перепада температуры.

6.Впервые определены характеристики пульсаций течения, возникающих при обтекании магнитного препятствия в цилиндрическом канале, а также предложена методика

контроля электропроводности среды на основе поиска экстремума на характеристиках электромагнитного индуктора бегущего поля.

7.Впервые получены экспериментальные характеристики процесса смешения разнотемпературных потоков натрия с оценкой частоты пульсации температуры на наружной поверхности канала.

Практическая значимость работы вполне убедительная.

1. На основе результатов, полученных при изучении математических моделей и физических экспериментов, разработаны и созданы новые высокотемпературные электромагнитные насосы, перемешиватели, расходомеры со 2-3 уровнем готовности технологии для предприятий металлургии и атомной промышленности; **жидкометаллический натриевый стенд** используется для проведения приемо-сдаточных испытаний аппаратов для атомных станций.

2. Результаты исследования поведения электровихревых течений во внешних магнитных полях необходимо учитывать при разработке и конструировании жидкометаллических батарей, дуговых печей, аппаратов дуговой сварки.

3. Результаты изучения конвективного теплообмена в цилиндрическом объеме и теплообмена при смешении разнотемпературных потоков жидкого натрия использованы **для верификации расчетных кодов** при конструировании новых электростанций с жидкометаллическими теплоносителями.

Апробация работы выдающаяся. 30 публикаций вышли в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, установленный Министерством образования и науки Российской Федерации для представления результатов докторских диссертаций и реферативные базы Scopus или Web of Science. Из них 7 опубликованы в изданиях Q1 и 6 опубликованы в изданиях Q2.

Высокая степень достоверности результатов справедливо определяется верификацией и валидацией математических моделей. Достоверность полученных расчетных результатов обеспечивается их согласованностью с экспериментальными данными, сеточной сходимостью.

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа содержит 345 страниц с 232 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 336 наименований.

Диссертация оппоненту очень понравилась. Она комплексная, трудовая, насыщенная красочным содержательным материалом. Все ее части довольно органичные. Целесообразно интерпретировать материал диссертации по главам, отметив новые научные результаты.

1. Течения в ячейках с локализованным подводом тока. Электровихревое течение (ЭВТ) генерируется действием электромагнитной силы, которая возникает в результате взаимодействия электрического тока и собственного магнитного поля тока. Для появления ЭВТ завихренность силы не должна быть равна нулю. Это обеспечено локализованным подводом тока. Показано, что причиной потери интенсивности крупномасштабного полоидального течения в цилиндрической ячейке с локализованным подводом электрического тока является формирование дополнительного полоидального течения вследствие появления аксиального градиента центробежной силы.

2. Течения, вызванные действием бегущих и вращающихся полей. Определение характеристик и измерение свойств турбулентности течений, созданных бегущими и вращающимися магнитными полями в цилиндрических ячейках, а также поиск конфигураций этих полей, создающих наиболее развитое азимутальное и полоидальное течение. С помощью кросс-корреляционного вейвлет-анализа можно выделить достоверную часть турбу-

лентных спектров течения, созданного бегущими или вращающимися магнитными полями, а чередование направления вращающегося магнитного поля по высоте цилиндрической ячейки приводит к наиболее развитому азимутальному и полоидальному течениям.

3. Влияние течений на процесс кристаллизации. Определение влияния воздействия течений, созданных бегущими и вращающимися магнитными полями, на процесс направленной кристаллизации и распределение свойств затвердевшего металла. Одновременное воздействие бегущего и вращающегося магнитных полей в ходе процесса кристаллизации существенно улучшает и гомогенизирует распределение свойств слитков.

4. Течение и конвективный теплообмен в наклонных ячейках. Анализ в физическом эксперименте поведения крупномасштабной конвективной циркуляции жидкого натрия в короткой цилиндрической ячейке при разных углах наклона его оси относительно вертикали. В короткой цилиндрической ячейке пульсации конвективной крупномасштабной циркуляции натрия сохраняются вплоть до 40 градусов наклона относительно вертикали, а использование в эксперименте теплообменников с индукторами повышает однородность граничных условий на торцах канала. Определение зависимости характеристик турбулентного конвективного теплообмена путем экспериментов в цилиндрических ячейках с жидким натрием, имеющих различные отношения длины к диаметру, от угла наклона их оси относительно вертикали. В цилиндрических ячейках с жидким натрием с различным отношением длины к диаметру зависимости интенсивности теплообмена от угла наклона близки по форме и имеют экстремум при наклоне около 60 градусов, при этом характеристики пульсаций скорости при малых углах показывают существенное отличие поведения течений в короткой и длинной ячейках.

5. Генерация и взаимодействие вихревых и транзитных течений. Определение характеристик процессов обтекания магнитного препятствия и генерации транзитных течений в цилиндрических каналах, а также разработка методик и устройств для создания и контроля интенсивных потоков.

В цилиндрическом канале неизотермическое обтекание локализованного магнитного препятствия порождает слабозатухающие по потоку пульсации, а положение экстремума на характеристиках электромагнитного индуктора бегущего поля определяется электропроводностью среды.

В зоне смешения разнотемпературных потоков натрия возникают неизотермические пульсации скорости, приводящие к появлению на наружной стенке канала областей с пульсирующей температурой.

Эта безусловно неординарная работа, к которой довольно не просто сформулировать замечания.

1. Интерпретация турбулентности в электровихревых течениях осуществляется с использованием полуэмпирической модели k-ω и модель крупных вихрей LES в варианте Смагоринского. Хотелось бы обосновать выбор моделей. Также интересно, на какой расчетной сетке реализован вихреразрешающий метод? Следует отметить, что моделирование турбулентности осуществляется без учета влияния электрических и магнитных полей на характеристики турбулентности.

2. В работе показано замечательное согласие данных измерений и численных прогнозов, как, например, на рис.2.31 сочетаются средний профиль Vz компоненты скорости при 50 Гц. Отклонение кривых не более 7%. Однако оценка неопределенности прогнозов и данных измерений оказывается порядка 100% от экстремальных величин. Хотелось бы разъяснить причину. Также интересно, что понимается под численными погрешностями.

3. На стр.38 на рис.1.14 приведены зависимости числа Рейнольдса от параметра S, которые очень близки для твердой и свободной верхней границы ячейки. Какой может быть причина того, что интенсивность электровихревого течения в эксперименте имеет слабую чувствительность к виду верхней границы ячейки — твердой или свободной?

4. На стр.233 на рис.4.17 приведены спектрограммы ориентации вихря для некоторых углов наклона ячейки. Видно, что для угла beta=20 градусов частота колебаний стабильна. Какая причина может вызвать вариации частоты колебания при вертикальном (beta=0) и близком к вертикальному (beta=10) положениях ячейки?

5. Насколько сильно по количеству элементов отличаются электродинамическая и гидродинамическая сетки и чем это обусловлено?

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием, представляющим крупный вклад в актуальный раздел механики жидкости и газа, связанный с разработка единого магнитогидродинамического подхода и решением с его помощью группы задач исследования течений жидкого металла и их влияния на процессы кристаллизации, теплообмена, регистрации расхода и генерации перепада давления в приложении к проблемам металлургии и энергетики. Диссертация И.В. Колесниченко «Фундаментальные аспекты магнитной гидродинамики жидких металлов в области значений параметров, характерных для технологических приложений» безусловно удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям, в том числе соответствует п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а Колесниченко Илья Владимирович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией фундаментальных исследований ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, доктор физико-математических наук по специальности 01.02.05 механика жидкости, газа и плазмы, профессор — Исаев Сергей Александрович

23 сентября 2024 года

isaev3612@yandex.ru 196210, СПб, Пилотов, 38, info@spbguga.ru, 9214045516

Подпись профессора Исаева С.А. заверяю

Проректор по научной и инновационной работе — Г.А. Костин