

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Перминова Анатолия Викторовича

на диссертационную работу Мандрыкина Сергея Дмитриевича

**«Течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитных сил и сил плавучести»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Мандрыкина С.Д. посвящена **актуальным проблемам**, связанным с влиянием на конвективные и электровихревые течения жидких металлов в замкнутых ёмкостях осложняющих факторов, таких как геометрические особенности ёмкости, её ориентация в пространстве, расположение электродов, внешние силовые поля. Перечисленные факторы способны существенным образом менять структуру течения и играть ключевую роль в реальных устройствах. **Актуальным** является использование в моделировании интенсивных сложных конвективных течений жидких металлов различных моделей турбулентностей, благодаря которым возможно описание таких течений на более грубых сетках, чем те, что требуются при прямом численном моделировании. Таким образом, появляется возможность нахождения в приемлемые сроки зависимостей режимов течения от параметров задачи в ранее неизученных сложных конфигурациях. Лабораторные эксперименты и, в некоторых случаях, прямое численное моделирование дают возможность верифицировать используемые модели турбулентности. Заявленная диссертантом **цель работы** состоит в численном и экспериментальном изучении влияния осложняющих факторов на течения жидких металлов в замкнутых полостях под действием электромагнитного поля или сил плавучести.

В работе **впервые** в трехмерной постановке исследована турбулентная конвекция жидкого натрия в цилиндре при ранее не рассмотренных значениях управляющих параметров (чисел Релея и Прандтля), при различных углах наклона емкости относительно силы тяжести. **Новыми** являются результаты экспериментального и численного исследований электровихревых течений галлиевой эвтектики в отсутствие и в присутствии внешнего магнитного поля при несогласованных топологиях течений и геометрии емкости. В результате численных расчетов получены **новые данные** об электровихревых течениях жидкого металла в замкнутых цилиндрических полостях различного аспектного отношения, в том числе во внешнем однородном магнитном поле. Показано, что электровихревое течение наиболее выражено при малых аспектных отношениях. Обнаружено, что внешнее аксиальное магнитное поле приводит к сильному подавлению электровихревого течения.

Результаты диссертации имеют фундаментальную **теоретическую значимость** для более глубокого понимания особенностей турбулентной конвекции жидких металлов при различных углах наклона между градиентом температуры и направлением силы тяжести. Кроме того, результаты дают представление о возможных механизмах управления пространственно-временными структурами электровихревых течений при использовании

нестандартных конфигураций подвода тока, различных аспектных отношений емкости, а также внешних магнитных полей. С **практической точки зрения** результаты могут быть использованы при разработке технологических устройств, в которых используются жидкометаллические теплоносители. Результаты могут быть востребованы в металлургии и энергетике, в частности, при проектировании жидкометаллических батарей.

**Достоверность экспериментальных результатов** обеспечивается тестированием методов измерений, использованием качественного измерительного оборудования. Верификация математических моделей на имеющихся экспериментальных данных и, где это возможно, сравнение с известными результатами других авторов обеспечивает **достоверность численных результатов**.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 118 страниц, из них 61 страница текста, включая 49 рисунков. Библиография включает 139 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** представлены результаты численного исследования турбулентной конвекции жидкого натрия в наклонном цилиндре с единичным аспектным отношением и аксиальным подогревом. Установлено, что при всех рассмотренных углах наклона цилиндра в нём на фоне развитого турбулентного течения присутствует крупномасштабная циркуляция. Наибольшая скорость такой осредненной циркуляции соответствует наклону в  $50^0$ , а наименьшая — наклону в  $90^0$ . При вертикальном положении цилиндра наблюдается сложная трехмерная динамика крупномасштабной циркуляции, а именно: изменение плоскости выделенного направления вращения, инверсии, низкочастотные колебания угла ориентации.

**Во второй главе** численно и экспериментально рассмотрено электровихревое течение в цилиндрическом объеме жидкого металла при локализованном токоподводе к боковой стенке двумя оппозитными электродами. В рассматриваемом случае ось симметрии, возникающего гидродинамического течения, не совпадает с осью симметрии цилиндра. В итоге электровихревое течение оказывается неустойчивым. Эксперименты и численное моделирование показали, что в цилиндрической полости с боковым оппозитным токоподводом возникает нестационарное электровихревое течение жидкого металла. Наложение магнитного поля, направление которого параллельно линии, соединяющей электроды, приводит к закрутке металла вблизи электродов и увеличивает как общую интенсивность течения, так и пульсации скорости.

**В третьей главе** численно решена задача об электровихревом течении галлиевого сплава, помещенного в цилиндрические емкости с различными аспектными отношениями. Показано, что такое течение возникает во всем рассмотренном диапазоне параметров задачи и имеет вид полоидального крупномасштабного вихря. Обнаружено, что изменение аспектного отношения цилиндра оказывает влияние на структуру, интенсивность, а также пульсационные характеристики течения. Увеличение аспектного отношения способствует неустойчивости крупномасштабного вихря и развитию мелкомасштабных структур.

**В четвертой главе** рассмотрена задача о влиянии слабого внешнего однородного постоянного магнитного поля на электровихревое течение жидкого металла в цилиндре с

аспектным отношением 0.5. Течение создается в осесимметричной конфигурации, когда один электрод расположен в центре нижнего торца цилиндра, а в качестве второго электрода выступает вся боковая стенка цилиндра. Расчеты показали, что течение в полости является результатом суперпозиции двух взаимно перпендикулярных потоков, полоидального и азимутального. Магнитное поле является эффективным инструментом для управления крупномасштабной циркуляцией жидкого металла, например, в достаточно сильном вертикальном магнитном поле наблюдается только азимутальная циркуляция.

**В заключении** приводятся основные результаты, полученные в диссертационной работе.

К **достоинствам диссертации** следует отнести приведенный автором литературный обзор. Результаты решения задач подробно проанализированы, из них выделены основные положения, которые лаконично сформулированы в конце каждой главы и в заключении к диссертации. Диссертант показал хорошее владение современными численными методами. Результаты, полученные в диссертации, имеют несомненную теоретическую и практическую значимость, могут быть полезны при проектировании технологических систем.

К работе можно высказать ряд **замечаний**.

1. В разделе 4 обзора литературы делается обзор численных методов решения гидродинамических задач. К сожалению, отсутствуют ссылки на работы Тарунина Евгения Леонидовича, представителя Пермской гидродинамической школы, сделавшего немало для развития метода конечных разностей применительно к задачам гидродинамики.
2. При описании математической постановки задач приводятся только уравнения движения и теплопроводности в их общем виде. Используемые в диссертации модели турбулентности описаны в п. 4 обзора литературы. Уравнений моделей турбулентности не приводится совсем. Наряду с базовыми уравнениями тепловой конвекции, уравнения моделей турбулентности являются основополагающими для решения задач диссертации. Их необходимо было привести и обсудить. Такое обсуждение подчеркнуло бы квалификацию автора.
3. На странице 45 в главе 1 сказано, что для проверки сходимости численного решения сравнивались числа Нуссельта и Рейнольдса для различных сеток. Числа приведены для трех сеток, однако, сравнительный анализ не выполнен. Не ясно, на основании каких соображений для расчетов выбрана сетка  $2,9 \cdot 10^6$  узлов. Надо отметить, что в главах 2 – 4 так же отсутствует анализ сходимости результатов расчетов с изменением количества узлов сетки и четко не представлены критерии выбора размерности сетки.
4. В главе 2 при постановке задачи выдвигается предположение, что нагревом металла в результате протекания токов через него можно пренебречь. Далее это предположение используется при формулировке задач в главах 3 и 4. Ни какой существенной аргументации в пользу такого предположения не приводится. Хотелось бы увидеть оценки, которые убеждают, что Джоулевым нагревом металла, а следовательно, и тепловой конвекцией в решаемых задачах разумно пренебрегать.

5. Работа не лишена грамматических, орфографических и стилистических ошибок. В ней достаточно много несогласованных фраз и оборотов, которые можно отнести к профессиональному сленгу, не всегда понятному стороннему читателю.

Приведенные замечания не снижают **общего положительного впечатления** от работы. Автореферат отражает содержание диссертации.

**Заключение.** Диссертационная работа Мандрыкина Сергея Дмитриевича выполнена на хорошем научном уровне, она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Мандрыкин Сергей Дмитриевич заслуживает присуждения степени **кандидата физико-математических наук** по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры общей физики факультета Прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29, а. 251, [perminov1973@mail.ru](mailto:perminov1973@mail.ru), +7 (342) 2-198-025

Перминов Анатолий Викторович

22.10.2021

Я, Перминов Анатолий Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку



Подпись Перминова А. В.

ЗАВЕРЯЮ:

Членский секретарь ПНИПУ

Членский секретарь ПНИПУ В.И. Макаревич

22» 10 2021 г.