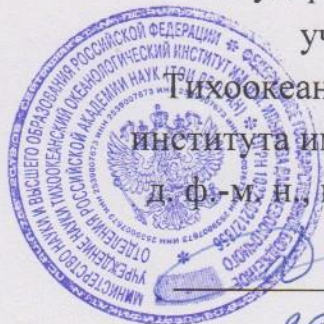


«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки

Тихоокеанского океанологического
института им. В.И. Ильичева ДВО РАН
д. ф.-м. н., профессор, академик РАН



/ Г.И. Долгих

« 29 » 08 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук о диссертационной
работе

Тюлькиной Ирины Валерьевны

«Коллективные явления в гидродинамических системах за рамками теории
Отта–Антонсена», представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Тюлькиной И.В. посвящена изучению коллективных эффектов, таких как синхронизация в ансамблях фазовых осцилляторов, к которым может быть сведено описание колебательных режимов термоконцентрационной конвекции в смежных ячейках пористой среды. Для ансамблей фазовых осцилляторов выводятся и исследуются строгие уравнения макроскопической динамики плотности вероятности состояний. Решается математическая проблема введения гауссова шума. Выводятся маломодовые редуцированные уравнения динамики параметров порядка, характеризующих степень синхронизации осцилляторов.

Целью диссертации является изучение коллективных явлений в гидродинамических системах в рамках фазового описания и развитие математического аппарата для описания

динамики параметров порядка. В частности, решается проблема построения обобщения теории Отта–Антонсена на ситуации, где условия применимости оригинальной теории выполняются неточно.

Актуальность и практическая значимость объясняется тем, что применение фазового описания в гидродинамических задачах позволяет расширить знания об управлении потоками путем изучения коллективных явлений, в частности, синхронизации нестационарных течений. С точки зрения проблем управления интерес представляют ситуации, где колебательные системы обладают слабой связью, или колебательная система испытывает слабое управляющее внешнее воздействие. Именно при таких условиях фазовое описание становится математически строгим для любых систем с устойчивым предельным циклом. В частности, фазовое описание оказывается востребованным для проблемы оптимального управления срывом вихрей при обтекании тела быстрым потоком, что позволяет манипулировать аэродинамическим сопротивлением объектов.

Использование формализма круговых кумулянтов позволило описать динамику систем связанных осцилляторов и построить теорию возмущений для случая гауссова шума, когда условия применимости оригинальной теории Отта–Антонсена нарушены. В диссертации демонстрируется возможность и перспективность использования формализма круговых кумулянтов для конкретных гидродинамических задач.

Полученные теоретические результаты и разработанный инструментарий будут востребованы в теоретических и экспериментальных исследованиях, связанных с явлениями самоорганизации и хаотизации в распределенных системах, в первую очередь — гидродинамических. В диссертации также проработаны вопросы, связанные с описанием влияния стохастических внешних условий в рамках развиваемых подходов. Таким образом, результаты диссертационного исследования будут востребованы в научно-исследовательской деятельности Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва ДВО РАН, в частности, в лаборатории геофизической гидродинамики, также в научно-исследовательской деятельности Института прикладной физики РАН, Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, МГУ, ННГУ им. Н. И. Лобачевского, СГУ им. Н. Г. Чернышевского, Пермского государственного университета.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Показана возможность применения фазового описания для изучения синхронизации в гидродинамических системах на примере конкретной физической задачи: колебательной термоконцентрационной конвекции с эффектом Соре в смежных ячейках пористой среды. Задача была решена полностью аналитически.

- Введен и использован формализм круговых кумулянтов для макроскопического описания ансамблей ориентационных и фазовых элементов. На основе формализма построено частное обобщение теории Отта–Антонсена в терминах круговых кумулянтов для систем иерархически связанных осцилляторов, расширяющее оригинальную теорию.
- Построена теория возмущений для систем связанных фазовых элементов с внутренним шумом, при котором условия применимости теории Отта–Антонсена нарушены.
- На основании формализма круговых кумулянтов предложен подход, позволяющий строить приближенные модели макроскопической динамики уравнения Фоккера–Планка с производной дробного порядка, которое описывает системы с аномальной диффузией. При этом удается обойти проблемы с формированием разрывов и отрицательных значений поля концентрации / плотности вероятности.

Оценка содержания диссертации

Текст диссертации содержит 130 страницы, включая 29 рисунков, и состоит из введения, трех глав, заключения и списка 120 источников литературы. Работа характеризуется полнотой и завершенностью.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, продемонстрированы научная новизна и достоверность результатов, описана их практическая и теоретическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

Представленный во введении литературный обзор включает в себя чисто гидродинамическую часть, посвященную конвективной устойчивости неизотермических бинарных смесей в пористых средах, и часть, посвященную исследованиям коллективных эффектов в ансамблях фазовых осцилляторов. В последней части рассмотрены существующие математические модели с использованием фазового описания в механике жидкости и газа (как теоретические, так и экспериментальные) и работы, относящиеся к синхронизации течений.

Глава 1 посвящена фазовому описанию колебательной термоконцентрационной конвекции в смежных ячейках пористой среды. Получены уравнения динамики в длинноволновом приближении. Построено аналитическое описание системы в рамках слабонелинейного анализа вблизи границы конвективной неустойчивости, и найдены уравнения для фаз колебаний конвективных течений в двух ячейках. Исследована синхронизация течения, и найдены соотношения для существования устойчивого синхронного режима.

Глава 2 посвящена обобщению теории Отта–Антонсена и построению описания динамики ансамблей в окрестности решения Отта–Антонсена в рамках формализма круговых кумулянтов. Получено более общее частное решение — двухгрупповое решение. Новое решение позволяет описывать динамику двухгрупповых состояний ансамбля в конечной окрестности решения Отта–Антонсена (являющегося одногрупповым). Доказана перспективность использования подхода круговых кумулянтов для больших ансамблей фазовых элементов. Подход продемонстрирован на системе двух симметричных связанных ансамблей осцилляторов Курамото–Сакагучи. Исследована динамика системы при разных начальных условиях, найдены параметры, при которых в системе существуют состояния – «Химеры».

Глава 3 посвящена построению теории возмущений и обобщению теории Отта–Антонсена на системы с внутренним шумом. Рассмотрена проблема численной неустойчивости счета с оборванными кумулянтными разложениями на примере «системы Абрамса» и способы подавления такой неустойчивости. Получены уравнения стохастической динамики фазы колебаний течения при случайной флуктуации внешних температурных условий для задачи о термоконцентрационной конвекции в пористой среде (глава 1). С помощью подхода круговых кумулянтов исследована проблема о степени синхронности колебаний конвективных течений в связанных ячейках. Показана применимость этого подхода для случая индивидуального шума в осцилляторах, тогда как теория Отта–Антонсена не позволяет описывать задачи такого типа. Построено макроскопическое описание динамики ансамблей фазовых элементов с негауссовыми дельта-коррелированными шумами, позволяющее обойти проблему нефизичного поведения плотности вероятности (формирования разрывов и т.п.). Применение подхода продемонстрировано на случае ансамбля Курамото с негауссовым шумом.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты исследований и определены перспективы дальнейшей разработки темы.

Достоверность результатов обеспечивается согласием с известными в литературе предельными случаями; соответствием между аналитическими результатами и результатами прямого численного счета; внутренней непротиворечивостью теоретических результатов; совпадением результатов, полученных в рамках разных подходов. Формализм круговых кумулянтов и редуцированные математические модели на его основе, представленные в диссертации, не только цитируются, но и используются другими авторами во множестве работ, включая публикации в журналах «Nature Index» (Nature, Nature Communications, Science, Physical Review Letters, PNAS). Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается их согласием с прямым численным счетом и прочими материалами в этих работах.

Диссертация прошла необходимую апробацию. Результаты исследований были представлены на конференциях всероссийского и международного уровней. Полученные результаты опубликованы в 8 работах, включая 2 статьи в журналах из списка ВАК и 5 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных WoS/Scopus.

По содержанию диссертационной работы имеются замечания:

1. В разделе 3.4, где шумовые слагаемые фазового уравнения выводятся из уравнений базовой гидродинамической задачи для конкретных типов внешних флуктуаций, диссертант, анализируя точность кумулянтного приближения, проводит сопоставление с точным решением (136), возможным в частных случаях. Диссертант указывает, что решение соответствует распределению фон Мисеса, однако, не приводит ни частный вид решаемого для этого уравнения Фоккера–Планка, ни самого решения. В публикациях диссертанта [5, 67] это точное решение также используется без вывода, и только в [5] можно найти ссылку на это решение в литературе [L. Bertini *et al.*, *Dynamical aspects of mean field plane rotators and the Kuramoto model*. J. Stat. Phys. **138**, 270 (2010)]. Решение не настолько простое и очевидное, чтобы приводить сразу результат.

2. Раздел 3.5, в котором рассматриваются негауссовы шумы, раскрыт гораздо менее подробно, чем остальные материалы в диссертации, и даже менее подробно, чем в соответствующей статье [Chaos **33**, 113102 (2023)]. При чтении этого раздела нужно опираться на материалы, с которыми знаком сравнительно небольшой круг узких специалистов, а диссертант излагает эти материалы крайне сжато. Раздел производит впечатление, что автор диссертации хотела показать это важное приложение развиваемого подхода круговых кумулянтов, но изложила материал сжато, поскольку оно является ответвлением от основной темы диссертационного исследования. Изложение раздела 3.5 является математически корректным, но тяжело для чтения.

3. В работе встречаются опечатки и спорная либо явно неверная пунктуация.

Заключение

Сделанные по работе замечания не снижают общей научной значимости и практической ценности полученных в работе результатов. Диссертационная работа Тюлькиной И.В. выполнена на достаточно высоком научном уровне и представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа была доложена автором на научном семинаре лаборатории геофизической гидродинамики ТОИ ДВО РАН «Коллективные явления в

гидродинамических системах за рамками теории Отта–Антонсена" (руководитель: д.ф.-м.н. Петров П.С.) 27.08.2024 г. Результаты и отзыв были обсуждены и одобрены участниками данного семинара, а диссертационная работа Тюлькиной И.В. рекомендована для защиты.

Диссертационная работа Тюлькиной Ирины Валерьевны «Коллективные явления в гидродинамических системах за рамками теории Отта-Антонсена» по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности и обоснованности научных положений и выводов соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор - Тюлькина Ирина Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории геофизической гидродинамики Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН Козицким Сергеем Борисовичем.

Заведующий лабораторией
лаборатории геофизической гидродинамики,
ТОИ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43,
тел. +7 (4232) 231-28-60
E-mail: petrov@poi.dvo.ru

Петров Павел Сергеевич

Старший научный сотрудник
лаборатории геофизической гидродинамики,
ТОИ ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43,
тел. +7 924 527 68 01
E-mail: skozi@poi.dvo.ru

Козицкий Сергей Борисович

Подпись Петрова П.С. и Козицкого Б.С. подтверждаю:
Ученый секретарь ТОИ ДВО РАН,
к.г.н.



Шлык Н.В.