

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 10.10.2024 № 137

О присуждении Тюлькиной Ирине Валерьевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Коллективные явления в гидродинамических системах за рамками теории Отта-Антонсена» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите 15.07.2024, протокол № 132, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018.

Соискатель Тюлькина Ирина Валерьевна 1995 г. рождения, в 2019 г. окончила ФГБОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по специальности «Физика». В 2023 г. окончила аспирантуру очной формы обучения в ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" по научной специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. В настоящее время работает младшим научным сотрудником лаборатории подземной утилизации углерода Института механики сплошных сред УрО РАН. Диссертация выполнена в ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук".

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории динамики дисперсных систем ИМСС УрО РАН Райхер Юрий Львович.

Официальные оппоненты:

1. Абрашкин Анатолий Александрович, доктор физико-математических наук (01.02.05), доцент, профессор кафедры математики ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (г. Нижний Новгород);
2. Постников Евгений Борисович, доктор физико-математических наук (05.13.18), заведующий отделом теоретической физики НИЦ физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Курский государственный университет» (г. Курск);
дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева" Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ТОИ ДВО РАН), г. Владивосток, в своем положительном заключении, составленным д.ф.-м.н. Петровым П.С., заведующим лаборатории геофизической гидродинамики; к.ф.-м.н. Козицким С.Б., старшим научным сотрудником, и утвержденном директором ТОИ ДВО РАН, д.ф.-м.н., профессором, академиком РАН Долгих Г.И., указала, что диссертация представляет собой завершенную

научно-исследовательскую работу в области теоретического исследования коллективных эффектов в гидродинамических системах. Актуальность темы объясняется тем, что применение фазового описания в гидродинамических задачах позволяет расширить знания об управлении потоками, путем изучения коллективных явлений, в частности, синхронизации нестационарных течений. 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. Представленная диссертационная работа «Коллективные явления в гидродинамических системах за рамками теории Отта–Антонсена» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Тюлькина Ирина Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Соискателем опубликовано 7 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

1. **Tyulkina I.V.**, Goldobin D.S., Klimenko L.S., Pikovsky A. Noisy oscillator populations beyond the Ott-Antonsen ansatz // *Physical Review Letters*. 2018. Vol. 120. Art. id. № 264101. (WoS, Scopus, Q1).

В работе разработан подход к описанию динамики больших ансамблей фазовых элементов на основе «круговых кумулянтов». В термодинамическом пределе эти переменные дают простое представление инвариантного решения Отта–Антонсена и на их основе возможно построение теории возмущений. Круговые кумулянты используются для изучения влияния малого внутреннего шума на динамику ансамбля.

2. **Тюлькина И.В.**, Голдобин Д.С., Клименко Л.С., Пиковский А.С. Двухгрупповые решения для динамики ансамблей фазовых систем типа Отта–Антонсена // *Известия Вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 8-9. С. 718-728. (ВАК, WoS, Scopus, Q3).

В работе строится расширение теории Отта–Антонсена. Находится новый (более широкий) класс частных решений – двухгрупповые состояния. На базе полученных уравнений исследуется динамика многогрупповых состояний-химер в связанных ансамблях Курамото–Сакагучи.

3. **Tyulkina I.V.**, Goldobin D.S., Pikovsky A. Stabilization of direct numerical simulation for finite truncations of circular cumulant expansions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 581. Art. id. № 012008. (WoS, Scopus).

В работе исследуется численная неустойчивость прямого моделирования с оборванными кумулянтными разложениями. Разрабатывается два подхода к ее подавлению при минимальной потере точности: с помощью введения искусственной диссипации и путем подавления слагаемых, ответственных за неустойчивость.

4. **Tyulkina I.V.**, Goldobin D.S., Klimenko L.S., Poperechny I.S., Raikher Y.L. Collective in-plane magnetization in a two-dimensional XY macrospin system within the framework of generalized Ott–Antonsen theory // *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2020. Vol. 378, № 2171. Art. id. № 20190259. (WoS, Scopus,

Q1).

В работе рассматривается проблема магнитных переходов между низкотемпературными (макроспиновыми упорядоченными) фазами в двумерных XY-массивах. Описание основано на стохастических уравнениях динамики отдельных магнитных моментов, к которым добавляется межчастичное взаимодействие в приближении среднего поля. С помощью метода обобщенной теории Отта–Антонсена строго получены и проанализированы уравнения динамики для параметров порядка (включая макроскопическую намагниченность) и статистическая сумма системы.

5. Долматова А.В., **Тюлькина И.В.**, Голдобин Д.С. Описание макроскопической динамики популяций фазовых элементов с белым негауссовым шумом на основе подхода круговых кумулянтов // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 3. С. 5-12. (ВАК).

Строится маломодовое макроскопическое описание динамики ансамблей фазовых элементов, подверженных действию негауссова белого шума, в терминах круговых кумулянтов. Получены двухкумулянтные редуцированные уравнения для альфа-устойчивых шумов. Применение подхода демонстрируется на случае ансамбля Курамото с негауссовым шумом.

6. **Тюлькина И.В.**, Голдобин Д.С. Синхронизация конвективных течений двухкомпонентной жидкости в смежных ячейках пористой среды // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 2. С. 59-68. (ВАК).

В работе исследуется термоконцентрационная конвекция двухкомпонентной жидкости в подогреваемых снизу смежных горизонтальных ячейках пористой среды при наличии поля тяжести. Описание системы строится полностью аналитически. Выводятся уравнения для фаз колебаний. Для этих уравнений найдены значения параметров системы, при которых существует режим синхронизации течений.

7. Dolmatova A.V., **Tyulkina I.V.**, Goldobin D.S. Circular cumulant reductions for macroscopic dynamics of oscillator populations with non-Gaussian noise // Chaos. 2023. Vol. 33. Art. id. № 113102. (WoS, Scopus, Q1).

В работе предложен подход на основании формализма круговых кумулянтов, позволяющий строить приближенные модели для описание макроскопической динамики систем с аномальной диффузией состояний (негауссовым шумом), при котором не возникает разрывов и отрицательных значений плотности вероятности состояний. Применение подхода использовано для описания фазовых переходов в ансамблях осцилляторов и иерархической системой связей.

Публикации содержат в сумме 72 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Абрашкина А.А. В отзыве отмечено, что при рассмотрении процессов, протекающих в гидродинамической системе, автор привлекает известные сведения, а также получает новые результаты в теории нелинейных колебаний и статистической физике, но все они в конечном итоге применяются к гидродинамическим объектам. В этом проявляется цельность и

законченность данной научной работы. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- замечание о правильности выбора названия диссертации;
- замечание об отсутствии ясности выбора граничных условий (стр. 22) и допустимой толщины «тонких» ячеек;
- замечание относительно вывода формулы для плотности вероятности (стр. 62) и отсутствия указания, что в геометрической прогрессии модуль множителя a_1 не может быть больше 1;
- замечание об отсутствии скобок в двойном интеграле для Z_j (стр. 63);
- рекомендации относительно использования термина «круговые кумулянты»;
- замечание по поводу включения раздела 3.5 в диссертацию.

2. Положительный отзыв официального оппонента Постникова Е.Б. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; отмечена научная и практическая значимость результатов. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- замечание о недостаточном обсуждении упрощения связи коэффициента самодиффузии и вязкости жидкости;
- замечание по поводу указания количественных критериев, например, относительной величины среднего абсолютного отклонения (AAD);
- замечание об обозначении различных величин одними и теми же буквами;
- рекомендация относительно иллюстрации распределения типа состояний как функции номеров осцилляторов в цепочке, а также приведении информации о зависимости мощностей подмножеств каждого типа от управляющих параметров.

3. Положительный отзыв ведущей организации ФГБУН ТОИ ДВО РАН. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области исследования коллективных эффектов в гидродинамических системах. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость. Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание об отсутствии вывода уравнения (136);
- замечание о недостаточном раскрытии раздела 3.5;
- замечание об опечатках и спорной либо явно неверной пунктуации.

На автореферат поступило 5 отзывов:

1. Положительный отзыв от Брацуна Д.А., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой прикладной физики ФГАОУ ВО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет", г. Пермь (2 замечания);
2. Положительный отзыв от Бриллиантова Н.В., д.ф.-м.н., профессора центра прикладного искусственного интеллекта АНОО ВО "Сколковский институт науки и технологий", г. Москва (без замечаний);
3. Положительный отзыв от Говорухина В.Н., д.ф.-м.н., профессора кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет", г. Ростов-на-Дону (3 замечания);

4. Положительный отзыв от Смирнова Д.А. д.ф.-м.н., профессора РАН, ведущего научного сотрудника Саратовского филиала ФГБУН "Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН", г. Саратов (2 замечания);
5. Положительный отзыв от Смирнова Л.А. к.ф.-м.н., заведующего лабораторией искусственного интеллекта и обработки большого массива данных ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского", г. Нижний Новгород (2 замечания).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- замечание, связанное с раскрытием результатов работы в разделах 1.4-1.5, 3.4-3.5.
- замечание о выборе термина «неидеальной идентичности элементов» (стр.4);
- замечание об отсутствии указания формул соответствия между параметрами фазовых уравнений (1) и исходных гидродинамических уравнений;
- вопрос о рассмотрении явления косимметрии в пористой среде;
- вопрос о сравнении аналитики с результатами численного моделирования;
- вопрос о связи гидродинамической системы в главе 1 и разделе 3.4;
- замечание об отсутствии указания связи систем уравнений главы 2 и главы 1;
- замечание об опечатках и пунктуации.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области механики и физики жидкости, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных работ; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБУН "Тихоокеанский океанологический институт им. В.И.Ильичева РАН", г. Владивосток, является одним из ведущих научных центров в области геофизической гидродинамики. Основные направления научной деятельности Института: механика жидкости, геология и геофизика, акустика и физика океана и атмосферы, геохимия и экология океана, спутниковая океанология. По данным направлениям Институт проводит фундаментальные исследования и участвует в разработке научных основ современной техники и технологии. Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов, обсужден и одобрен на научном семинаре лаборатории геофизической гидродинамики ТОИ ДВО РАН (руководитель д.ф.-м.н. Петров П.С.) 27.08.2024 г. в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан способ вывода уравнений динамики фазы для колебательных течений при слабонелинейных режимах нестационарной конвекции;

предложено основанное на формализме круговых кумулянтов описание процесса синхронизации колебаний связанных конвективных осцилляторов;

доказано, что синхронизация колебательных термоконтрационных конвективных течений в смежных ячейках пористой среды описывается математической моделью типа Курамото-Сакагучи;

введен регулярный подход к строгому выводу цепочек уравнений динамики круговых кумулянтов из уравнения эволюции характеристической функции

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

В данной работе впервые получены уравнения для фаз колебаний конвективных течений. При этом,

доказано, что двухкумулянтное приближение дает асимптотически описание коллективной динамики в системах осцилляторов в пределе слабого шума; применительно к паре связанных конвективных ячеек, подверженных влиянию флуктуаций внешних температурных условий, относительная погрешность двухкумулянтного решения во всем диапазоне интенсивности шума не превышает 5%, а в среднем составляет 1%;

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использован формализм круговых кумулянтов, позволивший описать динамику систем и построить теорию возмущений для случая внутреннего шума, даже такого, для которого не выполнены условия применимости стандартной теории Отта–Антонсена;

изложены результаты слабонелинейного анализа колебательной термоконтрационной конвекции в слое пористой среды и степени синхронизации таких течений в смежных ячейках с тепловой связью для водных растворов спирта и газовой смеси $\text{CO}_2\text{--N}_2$; **раскрыта** математическая природа трудностей, препятствовавших предпринимавшимся ранее попыткам построения непротиворечивого обобщения теории Отта-Антонсена: понимание этой природы продиктовало необходимость введения формализма круговых кумулянтов;

изучено влияние негауссовых флуктуаций на динамику круговых кумулянтов в рамках уравнения Фоккера-Планка с диффузионным слагаемым дробного порядка;

проведена модернизация алгоритмов численного моделирования оборванных цепочек кумулянтных уравнений: предложены и разработаны два подхода к подавлению численных неустойчивостей, вызываемых обрывом.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и внедрен подход к получению фазового описания колебательных режимов тепло- и массопереноса в системах с распределенными параметрами. Применение фазового описания в задачах гидродинамики позволит подойти к проблеме управления потоками путем изучения коллективных явлений, в частности, синхронизации течений;

определены условия синхронизации колебательных течений в смежных пористых ячейках при слабом отличии материальных параметров ячеек; полученные результаты и сам подход могут быть использованы для описания интегрального массо- и теплопереноса в массивах химических (микро)реакторов на основе пористых ячеек и теплоизолирующих пористых элементов;

создана программа для численного решения цепочек кумулянтных уравнений, позволяющая моделировать коллективную динамику ансамблей осцилляторов при высокой степени синхронности, а также повысить скорость вычислений;

представлен математический инструментарий для оптимизации процессов управления колебательными режимами течений и срыва вихрей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на известных приближениях и моделях гидродинамики – приближениях Дарси и Буссинеска;

идея базируется на обширном и плодотворном опыте эмпирического введения фазового описания для экспериментальных данных и положительном опыте работ, где такое описание вводилось на основе численного моделирования динамики распределенных систем;

использовано сравнение теоретических результатов для конвективной неустойчивости системы с известными в литературе результатами, полученными для частных случаев;

установлено соответствие между результатами высокоточного численного моделирования коллективной динамики ансамблей осцилляторов и результатами, полученными в рамках маломодовых редукций полной бесконечномерной системы уравнений на основе круговых кумулянтов;

использованы эффективные вычислительные методы и подходы к разрешению проблемы накопления машинной погрешности.

Личный вклад соискателя состоит в построении аналитического описания слабонелинейных режимов конвекции и фазовой редукции; получении и аналитическом исследовании уравнений двухкумулянтного приближения; написании вычислительных программ для численного моделирования задач. Диссертантом получена основная часть численных результатов. Постановка задач, результаты исследования и их интерпретация обсуждалась с научным руководителем Ю.Л. Райхером и соавторами публикаций. Выбор теоретических моделей и методов решения осуществлялся совместно с Д.С. Голдобиним. Подготовка публикаций проводилась совместно с Д.С. Голдобиним.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" № 842, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г.: в ней содержится решение задачи о применении описания в терминах фаз колебаний для изучения синхронизации в гидродинамических системах на примере конкретной физической задачи: колебательной термоконцентрационной конвекции с эффектом Соре в смежных ячейках пористой среды. Такое описание позволяет расширить знания об управлении потоками и оказывается востребованным для проблемы эффективного управления срывом вихрей при обтекании тела быстрым потоком, что позволяет манипулировать аэродинамическим сопротивлением объектов.

На заседании 10 октября 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Тюлькиной И.В. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 9 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании из 21 человека, входящего в состав совета, дополнительно введено на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 14, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., профессор,
Роговой Анатолий Алексеевич



_____/ Роговой А.А

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.036.01
д.ф.-м.н., доцент
Зуев Андрей Леонидович



_____/ Зуев А.Л.

11 октября 2024 г.