

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор
Института теоретической
физики им. Л.Д. Ландау РАН

док

Колоколов

ВЫПИСКА

из протокола заседания Сектора физики неравновесных состояний
Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН
22 января 2025 г.

(Заключение о диссертации Вергелеса С.С.

«Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими источниками»
по месту её выполнения)

СЛУШАЛИ: Доклад Вергелеса С.С. по диссертации «Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими источниками», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

ПОСТАНОВИЛИ: Принять следующее заключение о диссертации Вергелеса С.С.
«Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими источниками».

В диссертационной работе Вергелеса С.С. изучаются свойства генерации и поддержания вихревых течений путём их нелинейного взаимодействия с волнами и турбулентными течениями.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Полный объем диссертации составляет 286 страниц с 27 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 218 наименований.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, приведена структура диссертации, сформулированы основные цели исследования, аргументирована научная новизна, перечислены основные результаты работы и показана их теоретическая и практическая значимость.

Первая глава посвящена построению теории возбуждения приповерхностных вихрей поверхностными волнами в условиях покрытия поверхности жидкости тонкой жидкой плёнкой. В Пункте 1.1 «Введение» приводится развёрнутый обзор литературы, касающейся возбуждения поверхностными волнами вихревых течений. В частности, показано, что генерация волновым движением средних потоков вследствие образования вблизи границы течения вязкого пограничного слоя с последующим его нелинейным взаимодействием с полным волновым

движением носит общий характер. Аналогичная генерация наблюдается также при вязком трении поверхностных волн о дно на неглубокой воде, для инерционных волн во вращающейся жидкости при трении о стенки течения и при трении звуковых волн о границы течения; в последнем случае индуцированные вихревые течения называются акустическими. Рассматриваемый нами случай свободной поверхности, покрытой сжимаемой плёнкой, оказывается особым, поскольку в этом случае амплитуда индуцированного течения приобретает величину по обратному корню из вязкости. Далее в Пункте 1.2 формулируются управляющие уравнения, включая граничные условия на свободной поверхности, условия массового переноса вещества в плёнке и связь её поверхностного натяжения с поверхностной концентрацией этого вещества. Жидкость предполагается глубокой для волн. В Пункте 1.3 эти уравнения решаются в линейном по амплитуде волн приближении с целью определения характеристик волны, играющих роль при нелинейном возбуждении вихревых течений: зависимости скорости затухания волн, отношения горизонтальной и вертикальной амплитуд колебания лагранжевой частицы на поверхности и структуры вязкого пограничного слоя от величины модуля упругости плёнки. В Пункте 1.4 производится разделение поля скорости всего течения на волновое и вихревое течение. В волновом движении выделяется дрейф Стокса, который рассчитывается с учётом влияния поверхностной плёнки. Присутствие плёнки не изменяет дрейф Стокса вне вязкого пограничного слоя, однако внутри него и, в частности, на самой поверхности, относительное изменение дрейфа Стокса оказывается порядка единицы. В Пункте 1.5 получены общие выражения для вихревого течения с учётом влияния плёнки. Воздействие подсистемы волн на среднее вихревое течение можно представить как действие касательной силы, приложенной к поверхности жидкости, называемой виртуальным волновым напряжением. Динамика вихревого течения описывается уравнением Стокса, поскольку характеризующее его число Рейнольдса предполагается малым. Таким образом, проникновение завихренности медленного течения вглубь описывается диффузионным уравнением. Показано, что присутствие плёнки не изменяет пространственной структуры вихревого течения, однако сильно влияет на его амплитуду. Эти общие выражения адаптируются для случая распространения двух волн под прямым углом друг к другу в Пункте 1.6, когда формируются вихри, расположенные в шахматном порядке. Проведено сравнение предсказаний теории с экспериментом, в котором исследовалась динамика вихревого течения в результате сначала быстрого возбуждения поверхностных волн, затем их продолжительного воздействия с постоянной амплитудой, а затем быстрого их исчезновения. Случай распространения двух волн под малым углом друг к другу рассмотрен в Пункте 1.7, когда формируются вихри с масштабом, значительно превышающим длину волны. Рассмотрен промежуточный предел, когда жидкость глубока для волн, но имеет конечную глубину с точки зрения вихревого течения. Часть вычислений для этого случая вынесена в Приложение А. В Пункте 1.8 “Заключение” подводятся итоги этой части исследования.

Во Второй главе содержится первая часть исследования механизмов существования долгоживущих геострофических вихрей, поддерживаемых поглощением инерционных волн — изучение динамики инерционных волн на фоне крупномасштабного вихревого течения. В Пункте 2.1 “Введение” содержится обзор литературы по течению быстро вращающейся жидкости. Такие течения

можно разложить на две подсистемы, слабо взаимодействующие между друг другом — геострофическое течение, однородное вдоль оси вращения, и инерционные волны. Разделение происходит по скорости динамики, которая у геострофического течения относительно мала как число Россби. Для того, чтобы ввести основные объекты исследования, в Пункте 2.2 выводится уравнение Рейнольдса на среднее течение в вихре, содержащее напряжение Рейнольдса, которое является квадратичным по амплитуде волн и есть среднее по их ансамблю. Его условно положительный знак соответствует феномену отрицательной турбулентной вязкости, а условно отрицательный — обычной турбулентной вязкости. В Пункте 2.3 исследуется динамика волн на фоне среднего вихревого течения в линейном приближении по их амплитуде в предположении, что среднее течение представляет собой однородное в пространстве сдвиговое течение. Далее в Пункте 2.4 производится расчёт средних величин, квадратичных по амплитудам волн, — их средней кинетической энергии, напряжения Рейнольдса и скорости вязкой диссипации в подсистеме волн. В Пункте 2.5 эти вычисления проводятся до конца в пределе малого числа Россби для модельного случая статистически изотропной силы, возбуждающей инерционные волны. Показано, что средняя кинетическая энергия волн имеет логарифмическую величину по сравнению с напряжением Рейнольдса, знак которого соответствует отрицательной турбулентной вязкости. В Пункте 2.6 рассматривается задача о распространении инерционных волн в другой постановке, когда волна распространяется на фоне аксиально симметричного вихревого течения, имеющего произвольный медленно меняющийся в пространстве профиль радиальной зависимости скорости. Показано, что поглощение волн происходит в критическом слое, перед которым волна исчезает за счёт передачи своей энергии геострофическому вихрю. В Пункте 2.7 “Заключение” подводятся итог полученным закономерностям.

В Третьей главе изучаются радиальные профили среднего течения в долгоживущих вихрях в зависимости от контрольных безразмерных параметров течения и граничных условий. В Пункте 3.1 “Введение” дан обзор литературы по наблюдению и изучению долгоживущих вихрей в двумерных и вращающихся трёхмерных турбулентных потоках. Пункт 3.2 посвящён самой простой модели, когда стохастическая сила, возбуждающая течение, коротковолновая и статистически изотропная, число Россби мало, а границы течения отсутствуют. В этом случае удаётся аналитически решить уравнение Рейнольдса, результатом чего является линейно-логарифмический профиль среднего течения в вихре. Далее в Пункте 3.3 эта модель расширяется на случай конечных чисел Россби, когда появляется различие между циклонами и антициклонами. Для конечного числа Россби уже не удаётся аналитически найти ни напряжение Рейнольдса как функции числа Россби и конечной вязкости, ни решение уравнения Рейнольдса. В результате численного решения сначала уравнения на линейную динамику волн, последующего усреднения напряжения Рейнольдса по ансамблю волн и затем решения уравнения Рейнольдса установлено, что в циклонах максимум скорости смещается к его центру по сравнению с предсказанием линейно-логарифмического решения, тогда как в антициклонах, наоборот, это смещение происходит от центра. В Пункте 3.4 производится учёт влияния горизонтальных стенок. Горизонтальные границы приводят к появлению эффективного трения о дно в уравнении на геострофическое течение. Определён масштаб, на котором сравниваются влияния объёмной вязкости и трения о дно и находим радиальный профиль вихря на

масштабах больше и меньше, чем этот масштаб. В Подпункте 3.4.5 производится анализ экспериментальных данных на основе теории, разработанной в этой и в предыдущей главах для поглощения инерционных волн аксиально симметричным вихрём. В Пункте 3.5 изучается динамика крупномасштабных аксиально симметричных возбуждений, называемых также зональными течениями, на фоне среднего вихревого течения. Наконец, полученные результаты суммируются и анализируются в Пункте 3.6 “Выводы”.

В Четвёртой главе развита теория, устанавливающая связь между корреляционными функциями скаляра и размешивающего его гладкого в пространстве и хаотического во времени поля скорости, в том числе, имеющего сильную постоянную сдвиговую компоненту. Эту задачу можно рассматривать как скалярную модель, соответствующую преломлению векторного поля инерционной волны в слабо неоднородном вихревом течении. Скалярная модель проще, что позволяет включить в неё и систематически исследовать влияние крупномасштабных флуктуаций вихревого течения. Обзор литературы произведён в Пункте 4.1 “Введение”. Описание математической модели перемешивания в гладком случайном поле скорости дано в Пункте 4.2, где, в частности, обсуждаются общие свойства статистики лагранжевых траекторий в гладких случайных потоках. Определяются две постановки задачи о перемешивании скаляра — распадная задача и задача с непрерывной накачкой. Свойства часто используемой модели коротко-коррелированного во времени градиента поля скорости приведены в Приложении Б. Связь свойств парной корреляционной функции в распадной задаче со статистикой градиента поля скорости установлена в Пункте 4.3. В этой связи в статистике поля скорости играет роль только распределение главной степени растяжения элемента объёма жидкости потоком. Для корреляционной функции четвёртого порядка это сделано в следующем Пункте 4.4. В случае трёхмерного течения эта корреляционная функция связана со совместной функцией распределения главной и следующей степеней растяжения элемента жидкости. В случае двумерного течения независимой степенью растяжения является только первая (главная), вследствие чего существенную роль в искомой связи играет диффузия. Получение уравнений на корреляционные функции скаляра в модели коротко-коррелированного во времени градиента поля скорости вынесено в Приложение В. Статистические свойства перемешивания в случайном течении с сильной сдвиговой компонентой, в частности, одноточечные моменты скаляра, изучены в Пункте 4.5. В Пункте 4.6 “Заключение” производится анализ совокупности полученных результатов.

В ЗаклЮчении сформулированы основные результаты и выводы работы, сформулированы рекомендации по использованию полученных результатов и обозначены перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Основные результаты диссертации были изложены в 13 публикациях в изданиях из списка ВАК и индексируемых в международных базах данных Web of Science Core Collection и Scopus:

- [1] V.M. Parfenyev, S.S. Vergeles and V.V. Lebedev. “Effects of thin film and Stokes drift on the generation of vorticity by surface waves”. *Physical Review E* **94**(5), 052801 (2016)
- [2] V.M. Parfenyev and S.S. Vergeles. “Influence of a thin compressible insoluble liquid

film on the eddy currents generated by interacting surface waves.” *Physical Review Fluids* **3**(6), 064702 (2018)

[3] V.M. Parfenyev, S.V. Filatov, M.Y. Brazhnikov, S.S. Vergeles and A.A. Levchenko. ”Formation and decay of eddy currents generated by crossed surface waves.” *Physical Review Fluids* **4**(11), 114701 (2019)

[4] V.M. Parfenyev and S.S. Vergeles. ”Large-scale vertical vorticity generated by two crossing surface waves.” *Physical Review Fluids* **5**(9), 094702 (2020)

[5] I.V. Kolokolov, L.L. Ogorodnikov and S.S. Vergeles. ”Structure of coherent columnar vortices in three-dimensional rotating turbulent flow.” *Physical Review Fluids* **5**(3), 034604 (2020)

[6] V.M. Parfenyev, I.A. Vointsev, A.O. Skoba and S.S. Vergeles. ”Velocity profiles of cyclones and anticyclones in a rotating turbulent flow.” *Physics of Fluids* **33**(6), 065117 (2021)

[7] V.M. Parfenyev and S.S. Vergeles. ”Influence of Ekman friction on the velocity profile of a coherent vortex in a three-dimensional rotating turbulent flow.” *Physics of Fluids* **33**(11), 115128 (2021)

[8] L.L. Ogorodnikov and S.S. Vergeles. ”Structure function of velocity in a geostrophic vortex under strong rotation.” *Physics of Fluids* **34**(12), 125111 (2022)

[9] N.A. Ivchenko and S.S. Vergeles. ”Waves in a coherent two-dimensional flow.” *Physics of Fluids* **33**(10), 105102 (2021).

[10] Д.Д. Тумачев, С.В. Филатов, С.С. Вергелес и А.А. Левченко. ”Два режима динамики когерентных столбовых вихрей во вращающейся жидкости.” *Письма в ЖЭТФ* **118**(6), 430 (2023)

[11] S.S. Vergeles. ”Spatial Dependence of Correlation Functions in the Decay Problem for a Passive Scalar in a Large-Scale Velocity Field.” *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **102**(4), 685 (2006)

[12] Н.А. Ивченко и С.С. Вергелес. ”Статистика пассивного скаляра в двумерном сдвиговом течении с флуктуациями.” *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики* **163**(5), 724 (2023)

[13] С.С. Вергелес. ”Корреляционные функции пассивного скаляра как мера статистики градиента скорости.” *Письма в ЖЭТФ* **120**(4), 288 (2024)

Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных сессиях Совета по нелинейной динамике (г. Москва, 2019-2021, 2023 гг.), XX Научной школе «Нелинейные Волны – 2022» (г. Нижний Новгород), международных конференциях «Landau Days 2020», «Landau Days 2021», «Landau Days 2022» в г. Черногловка, «Landau Week» (г. Ереван, 2023), «XXIII Зимней школе по механике сплошных сред» (г. Пермь, 2023), Warwick Turbulence Symposium (Warwick, 2006), V Международной конференции «Наука будущего» (г. Орёл, 2023), Третьей Международной Конференции «Физика конденсированных состояний» ФКС-2023 (г. Черногловка), школах-конференциях «Современная гидродинамика 2023», «Современная гидродинамика 2024» (г. Черногловка), Школе-конференции по теоретической физике конденсированного состояния (г. Саров, 2024), Русско-индийской конференции «Frontiers of Theoretical Condensed Matter Physics» (г. Черногловка, 2024), Юбилейной международной конференции --- 60 лет Институту теоретической физики им. Л.Д. Ландау (г. Черногловка, 2024), международном симпозиуме «Неравновесные процессы в сплошных средах 2024» (г. Пермь), XXI научной школе «Нелинейные волны -- 2024» (г. Нижний Новгород), на семинарах в

Институте теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН (Черноголовка), Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (Москва, 2023), Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Москва, 2023, 2024), НИИ Механики МГУ (Москва, 2024), Объединённом институте высоких температур РАН (Москва, 2024), Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (2024), Институте Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (2024), Институте прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН (2024), Пермском национальном исследовательском политехническом университете (2024). Подробный обзор всех результатов диссертации был представлен автором на заседании Учёного совета ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН 13 сентября 2024 года.

Опубликованные по теме диссертации работы в полной мере отражают ее содержание. Объем и уровень проведенного теоретического исследования, а также новизна и актуальность полученных результатов, свидетельствуют о том, что диссертация Вергелеса С.С. удовлетворяет всем требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени доктора физико-математических наук.

На основании вышеизложенного Сектор физики неравновесных состояний ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН рекомендует диссертацию Вергелеса С.С. «Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими источниками» к публичной защите по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика» (физико-математические науки).

Заведующий сектора
физики неравновесных состояний
главный научный сотрудник
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
док.физ.-мат.наук, член-корр. РАН

Лебед

