

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Ерманюка Евгения Валерьевича
на диссертацию Вергелеса Сергея Сергеевича
«Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими источниками»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.3. – «Теоретическая физика».

Актуальность диссертационной работы

Исследование нелинейных процессов взаимодействия между «медленными» и «быстрыми» компонентами течения является одной из фундаментальных проблем современной физической гидродинамики, имеющей важное значение в большом количестве приложений, в частности, при описании ключевых типов геофизических течений. В диссертации С.С. Вергелеса указанная общая проблема рассмотрена в приложении к формированию течений в приповерхностном слое жидкости при наличии волн и покрывающей свободную поверхность жидкости пленки, а также в приложении к задачам формирования, структуры и энергетического баланса крупномасштабных циклонических и антициклонических геострофических течений в присутствии континуума инерционных волн; рассмотрена также задача о перемешивании пассивного скаляра в статистически изотропном поле скорости с нулевым средним и при наличии сильного сдвига с флуктуациями. Важно отметить, что помимо несомненного фундаментального интереса, рассмотренные в диссертации задачи актуальны с точки зрения физической интерпретации результатов экспериментов, поскольку рассмотренные в диссертации постановки дают возможность анализа влияния ряда присутствующих в эксперименте факторов, являющихся трудно контролируемыми (например, физических свойств поверхностной пленки), либо сложными для описания в рамках других моделей (например, учет влияния границ области, перпендикулярных оси вращения при исследовании динамики геострофического течения).

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации (13 ключевых публикаций), списка литературы, списка рисунков и трех приложений. Работа представлена на 286 страницах, содержит 27 рисунков, список литературы состоит из 218 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, обоснованы новизна и практическая ценность полученных результатов, раскрыто содержание диссертации по главам.

В первой главе диссертации, состоящей из восьми разделов, включая введение и заключение, изложено исследование задачи о возбуждении вихревых течений поверхностными волнами в присутствии поверхностной пленки. Рассмотрена задача о слабо затухающих гравитационно-капиллярных волнах при наличии поверхностной пленки и слабом влиянии вязкости. Описаны результаты для линейной задачи для гравитационно-капиллярных волн и волн Марангони для случаев свободной поверхности, сжимаемой и несжимаемой пленки. Проведено разделение полного течения на быстрые волновые осцилляции и массовый транспорт, выделены две части массового транспорта: дрейф с Стокса и медленная часть эйлера движения. В течении выделены существенные структурные компоненты, имеющие различный вертикальный масштаб: вязкий подслой, гребнево-выпадинный слой, возбужденное медленное течение. Показана необходимость учета вертикального переноса вязкого подслоя вместе с поверхностью. Рассмотрено возбуждение медленного вихревого течения при наличии несжимаемой пленки и для случая пленки с конечной сжимаемостью. Показано, что наличие пленки приводит к существенному увеличению магнитуды медленного вихревого течения, причем максимум эффекта соответствует максимуму затухания волны и, соответственно, наиболее эффективному

возбуждению эйлеровой составляющей массопереноса. Далее анализ распространен на исследование генерации вихревого течения двумя волнами, распространяющимися под прямым углом друг к другу. Важно отметить, что построенная теория дает два независимых способа определения безразмерного модуля упругости пленки: путем измерения соотношения между амплитудами горизонтального и вертикального движения частиц жидкости в волне, а также путем измерения затухания волны. Выполнено сопоставление теоретических (аналитических и численных) оценок с данными эксперимента по исследованию возбуждения крупномасштабного вихревого течения в волновой системе при включении колебаний плунжеров, его выхода на установившийся режим, и его затухания после выключения колебаний. Получено хорошее согласие теории и эксперимента. Далее исследован случай генерации крупномасштабного вихревого течения волнами, распространяющимися под малым углом друг к другу. Изучено влияние угла между направлениями распространения волн на амплитуду волновой системы, глубину проникновения эйлерового вклада в массоперенос, рассмотрен случай стоячих волн, выполнена оценка влияния конечной глубины жидкости.

Вторая глава, состоящая из 7 разделов, включая введение и заключение, посвящена исследованию распространения инерционных волн на фоне геострофического течения. Во введении приведен обзор современного состояния исследований по данной проблеме, проведено обсуждение эффектов, связанных с двумеризацией течения при быстром вращении и ролью инерционных волн в каскаде энергии, сформулирована основная проблематика, постановка задачи и структура исследования. Проведено разделение течения по масштабам на геострофическое крупномасштабное течения и мелкомасштабные турбулентные пульсации, рассмотрены баланс момента импульса и баланс энергии в аксиально-симметричном среднем течении. Ключевым результатом является вывод о необходимости установления отрицательной турбулентной вязкости для поддержания существования когерентного вихря. Величина отрицательной турбулентной вязкости должна компенсировать диссипативные процессы, связанные с влиянием молекулярной вязкости и трением о дно. В пределе малого числа Россби, т.е. в предположении о быстром вращении, динамика турбулентных пульсаций может быть отождествлена с динамикой инерционных волн, имеющих специфическое дисперсионное соотношение. Показано, что доля энергии, уходящая в тепло, мала, а основная доля кинетической энергии инерционных волн передается когерентному крупномасштабному течению, хотя имеется часть инерционных мод с определенным волновым числом, которые, наоборот, отбирают энергию у крупномасштабного вихревого течения. Показано, что волны, имеющие момент импульса, совпадающий по знаку с моментом импульса в вихре, поглощаются достаточно интенсивным вихрем, а волны, имеющие противоположный по знаку момент импульса, отражаются. Результатом исследований в главе 2 явилось определение радиально-азимутальной компоненты тензора Рейнольдса в зависимости от мощности источника, сдвига в дифференциальном течении вихря, чисел Россби и Рейнольдса.

В третьей главе, состоящей из шести частей, включая введение и заключение, проведено исследование радиальных профилей когерентных геострофических вихрей. На основе результатов главы 2 найден радиальный профиль азимутальной скорости в пределе малых чисел Россби для неограниченного в осевом направлении течения, показано, что профиль является линейно-логарифмическим. Далее, исследовано влияние конечности числа Россби (с учетом различия знака для циклонов и антициклонов), значения числа Рейнольдса, а также наличия перпендикулярных оси вращения границ на профиль когерентного вихря. В пределе малых чисел Россби профили для циклонов и антициклонов совпадают (с точностью до знака), а для конечных значений числа Россби показано, что максимум абсолютного значения азимутальной скорости смещается к центру вихря в циклонах и к периферии – в антициклонах. На основании теоретических соотношений сделаны выводы о качественных зависимостях характерных размеров циклонов и антициклонов от чисел Россби и Рейнольдса. В пределе малого числа Россби проанализировано влияние трения Экмана на профиль скорости в вихре в случае наличия твердых границ, перпендикулярных оси вращения; показано, при каких условиях трение несущественно, и радиальный профиль азимутальной скорости является

линейно-логарифмическим, в случае же существенного влияния трения Экмана профиль скорости плоский. Выполнено сравнение предсказаний теории с экспериментальными данными. В заключительной части третьей главы рассмотрены волны конденсата, когда поддержание крупномасштабного геострофического течения осуществляется за счет мелкомасштабного геострофического течения. В вихре достаточно большого радиуса в сравнении с вязким масштабом могут возбуждаться аксиально-симметричные медленные возмущения среднего течения. Если же размер вихря мал, волны не распространяются.

Четвертая глава состоит из 6 разделов, включая введение и заключение, она посвящена исследованию перемешивания пассивного скаляра на малых масштабах турбулентными флуктуациями при наличии и отсутствии фоновой сдвиговой компоненты течения. Рассмотрено перемешивание пассивного скаляра в потоке, характеризующемся гладким хаотическим полем скорости, причем характерный масштаб пространственного распределения скаляра много меньше масштаба поля скорости. Рассмотрено перемешивание как в потоке с нулевым средним, так и в потоке с сильным постоянным сдвигом. Для случайного во времени потока с изотропной статистикой показано, что пространственная зависимость парной корреляционной функции скаляра в распадной задаче на больших временах описывает распределение расстояния между двумя близкими лагранжевыми траекториями при их фиксированном расстоянии в начальный момент времени. Установлена связь между корреляционной функцией четвертого порядка и статистическими свойствами потока. Показано, что в трехмерном случае пространственная зависимость корреляционной функции описывает совместную функцию распределения двух степеней растяжения элементарного объема жидкости. Рассмотрена задача о перемешивании скалярного поля в случайном гладком двумерном течении с сильной средней сдвиговой компонентой. Получена статистика моментов пассивного скаляра для распадной задачи. Показано, что задача о перемешивании при наличии сдвига может быть качественно сведена к задаче с изотропной статистикой путем перемасштабирования по одной из осей координат.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы, рекомендации по использованию полученных результатов и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в получении новых теоретических соотношений, описывающих наблюдаемые в эксперименте и природе явления. В частности, выявлена взаимосвязь медленных вихревых течений с затуханием поверхностных волн в присутствии пленки. Разработана концепция касательного напряжения Рейнольдса, развиваемого поверхностными волнами, что имеет принципиальное значение для понимания динамики геострофических когерентных течений в присутствии континуума инерционных волн. Установлена важная для статистической гидродинамики связь между разноточечными корреляционными функциями скаляра и функцией распределения лапуновских экспонент в случайном потоке.

С практической точки зрения, полученные в диссертации результаты позволяют выполнить оптимальное планирование экспериментальных и вычислительных кампаний, а также выбрать наиболее эффективные подходы к анализу и пост-процессингу получаемых данных. В частности, полученные результаты уже были с успехом применены для анализа всей совокупности экспериментальных данных о генерации вихревого течения в жидкости при наличии поверхностной пленки. Линейно-логарифмический профиль, полученный для когерентного геострофического вихря в отсутствии трения о дно, был наблюден в численном моделировании двумерного когерентного течения. Развита в диссертации теория распространения пакетов инерционных волн в неоднородном геострофическом течении была успешно применена для интерпретации экспериментальных данных. Выводы о том, что циклоны являются более устойчивыми и долгоживущими в сравнении с антициклонами качественно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Построенная в диссертации теория перемешивания пассивного скаляра в гладком поле скорости со случайной

компонентой может быть применена для интерпретации имеющихся экспериментальных данных.

Достоверность, степень обоснованности и научная новизна полученных автором диссертации результатов и положений, выносимых на защиту, не вызывают никаких сомнений. Достоверность результатов обеспечена надёжностью применённых аналитических методов. Для части полученных теоретических результатов проведено сопоставление с результатами натурных и численных экспериментов, получено убедительное согласие. Полученные в диссертации результаты находятся в соответствии с результатами, полученными ранее другими исследователями.

Все результаты, выносимые на защиту, являются новыми. В частности, впервые исследовано влияние поверхностной плёнки на генерацию поверхностными волнами вихревых течений, взаимное влияние ансамбля инерционных волн и среднего геострофического вихревого течения, а также связь разноточечных корреляционных функций пассивного скаляра со статистикой градиента поля скорости. В каждой главе диссертации имеется введение, в котором отражено современное состояние литературы по исследуемому вопросу, обоснована проблематика выполненного автором исследования, показаны его место и новизна.

Замечания по диссертации:

1. В тексте диссертации в некоторых местах присутствуют повторения, например на стр. 8 дважды дается определение когерентных вихрей и конденсата, на стр. 10 в одном предложении используются «наблюдение» и «наблюдалось»
2. На стр. 31 имеется утверждение: «В силу малой массовой плотности воздуха, его достаточно моделировать пустотой с точки зрения динамики жидкости.» Это утверждение, конечно, верно для волн малой амплитуды при отсутствии обрушения, при наличии обрушения существуют примеры течений, для которых влияние воздуха на диссипацию значительно: Iafrati A., Babanin A., Onorato M. “Modulational Instability, Wave Breaking, and Formation of Large-Scale Dipoles in the Atmosphere” // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 184504, DOI:10.1103/PhysRevLett.110.184504
3. На стр. 41 использовано не очень удачное выражение «сила пленки»: «Однако при увеличении силы плёнки...»
4. На стр. 64 отмечено: «Наилучшее приближение численным интегрированием экспериментальных данных было достигнуто при значении безразмерной упругости плёнки $(1.22) \epsilon = 0.33$.» Имеются ли какие-то независимые литературные данные о величине этого параметра?
5. Стр. 71 - не очень понятен смысл выражения «Дрейф Стокса определяется последним периодом колебания волны...»
6. На стр. 74 не очень понятна фраза: «Если длина распространения волны сравнима или меньше, чем размер бассейна, то эти две волны являются бегущими.» Под длиной распространения волны понимается масштаб, на котором происходит существенное затухание волны?
7. На стр. 83 величина Σ введена согласно построению: «Локально же это течение представляет собой сдвиговое течение с силой $\Sigma = r \partial_r (V^G/r) \dots$ » Величина Σ имеет смысл комбинации завихренности и растяжения, наложенных друг на друга с определенными весами. Правильно ли называть ее силой? Может было бы уместнее использовать термин «интенсивность»?
8. В главе 4 приводятся несколько способов подсчёта парной корреляционной функции скаляра, одним из которых строится на представлении распределения скаляра как совокупности случайно разбросанных в пространстве кляксов. Как на этом языке можно объяснить независимость парной корреляционной функции от величины

молекулярной диффузии на больших масштабах, хотя даже если больший размер клякса от неё не зависит, то меньший (поперечный) их размер не может быть меньше диффузионной длины, то есть зависит от диффузии?

Сделанные замечания не снижают научную значимость полученных в диссертации С.С. Вергелеса результатов, положений и выводов.

Заключение

Диссертация С.С. Вергелеса является завершённым научным исследованием, соответствующим специальности 1.3.3. — «Теоретическая физика». Автореферат соответствует тексту рукописи диссертации.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации С.С. Вергелеса «Генерация когерентных течений регулярными и хаотическими источниками» можно сделать обоснованное заключение о том, что диссертация соответствует требованиям п. 9 – 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842 (ред. от 01.10.2018), а её автор Сергей Сергеевич Вергелес заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3. — «Теоретическая физика»

Доктор физико-математических наук

(01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы)

директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

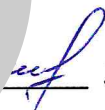
21.04.2025

Ерманюк Евгений Валерьевич

Подпись Е.В.

Врио ученого

к.ф.-м.н.



Любашевская Ирина Васильевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук.

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

<http://www.hydro.nsc.ru>

Телефон: (383)333-12-41

факс: (383)333-16-12

адрес электронной почты: ermanyuk@hydro.nsc.ru