

ОТЗЫВ

официального оппонента Брацуна Дмитрия Анатольевича
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»

Диссертационная работа С. С. Вергелеса посвящена исследованию ряда задач, объединенных тематикой динамики волновых структур в средах с различными осложняющими факторами. Рассмотрены задачи о распространении поверхностных волн в условиях покрытия межфазной поверхности жидкостью – газ тонкой жидкой плёнкой; о взаимодействии инерционных волн с геострофическим течением во вращающейся системе; о статистических свойствах процесса перемешивания формального скалярного поля потоком с сильной сдвиговой компонентой. Все задачи носят общий характер и определяют крупные направления теоретических исследований в своей области. Хотя исследования в этих областях гидромеханики идут уже давно, с теоретической точки зрения в них до сих пор остаются широкие белые пятна. Причин такого положения вещей несколько. Например, организация контроля за ПАВ на межфазных поверхностях (включает дозирование веществ, измерение их концентраций, кинетических констант и т.д.) в физическом эксперименте до сих пор сталкивается с существенными трудностями. Это означает, что эксперимент до сих пор не может обеспечить теоретиков надежными экспериментальными данными для построения теории, давая в разных работах противоречивые и слабо воспроизводящиеся результаты из-за неконтролируемых ПАВ. Это приводит к тому, что теоретики часто не знают достоверно как на самом деле ведет себя физическая система, что ведёт к появлению не вполне обоснованных теорий. В случае геострофических течений также до сих пор имеется ряд нерешенных вопросов, которые неизменно привлекают внимание теоретиков. Всё вместе сказанное определяет высокую **актуальность** рассматриваемого диссертационного исследования.

По каждому направлению автор смог сформулировать достаточно простые теоретические модели, важным достоинством которых является то, что они вполне реализуемы (при определенных усилиях) в эксперименте. В ходе исследования свойств моделей автору удалось получить ряд красивых аналитических результатов, демонстрирующих важные фундаментальные принципы изучаемых явлений. Эти результаты подкреплены численными расчетами, а где это было возможно — сравнением с экспериментальными данными. Там, где эксперименты ещё не поставлены, соискатель даёт взвешенные рекомендации по экспериментальной реализации и обоснованные предсказания, что будет наблюдаться в том или ином случае.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы и трёх

приложений. Полный объём диссертации составляет 286 страниц, включая 27 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 218 наименований.

Во **введении** обозначены цель и задачи исследования, ее новизна, научная значимость, а также приведено краткое содержание диссертации.

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 по заявленной тематике. В Пункте 1.2 автор формулирует определяющие 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 1.3 эти уравнения решаются в линейном по амплитуде волн приближении с целью определения характеристик волны, играющих роль при нелинейном возбуждении вихревых течений. В 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. В 1.5 получены общие выражения для вихревого течения с учётом влияния плёнки. Показано, что присутствие плёнки не изменяет пространственной структуры вихревого течения, однако сильно влияет на его амплитуду. Затем 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. Случай распространения двух волн под малым углом друг к другу рассмотрен в Пункте 1.7. Часть вычислений вынесена в Приложение А. Выводы главы приведены в Пункте 1.8.

Во **Второй главе** приводятся исследования механизмов существования долгоживущих геострофических вихрей, поддерживаемых поглощением инерционных волн. Обзор литературы по течению быстро вращающейся жидкости представлен в 2.1. Затем в 2.2 выводится уравнение Рейнольдса на среднее течение в вихре, содержащее напряжение Рейнольдса. Динамика волн на фоне среднего вихревого течения в линейном приближении по их амплитуде и в предположении, что среднее течение представляет собой однородное в пространстве сдвиговое течение исследуется в 2.3. Далее в 2.4 производится расчёт средних величин, квадратичных по амплитудам волн. В 2.5 эти вычисления проводятся в пределе малого числа Россби для модельного случая статистически изотропной силы, возбуждающей инерционные волны. В 2.6 рассматривается задача о распространении инерционных волн на фоне аксиально-симметричного вихревого течения, имеющего произвольный медленно меняющийся в пространстве профиль радиальной зависимости скорости. В 2.7 даны выводы по главе.

В **Третьей главе** изучаются радиальные профили среднего течения в долгоживущих вихрях в зависимости от контрольных безразмерных параметров течения и граничных условий. Обзор литературы по теме главы дан в 3.1.

Раздел 3.2 посвящён случаю, когда стохастическая сила, возбуждающая течение, коротковолновая и статистически изотропная. Получено аналитическое решение уравнения 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. В результате численного решения 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 3.4 автор производит учёт влияния горизонтальных стенок, которые приводят к появлению эффективного трения о дно в уравнении на геострофическое течение. В Подпункте 3.4.5 производится анализ экспериментальных данных на основе теории, разработанной в этой и предыдущей главах для поглощения инерционных волн аксиально-симметричным вихрём. В 3.5 изучается динамика крупномасштабных аксиально-симметричных возбуждений, называемых также зональными течениями, на фоне среднего вихревого течения. Наконец, полученные результаты суммируются в 3.6.

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. Обзор литературы произведён в Пункте 4.1. Описание математической модели перемешивания в гладком случайном поле скорости дано в 4.2. 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. Для корреляционной функции четвёртого порядка это сделано в следующем Пункте 4.4. 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. Выводы главы даны в 4.6.

В **Заключении** подведены основные итоги исследования, сформулированы рекомендации по использованию полученных результатов и обозначены перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Необходимо отметить, что большинство результатов диссертационной работы **получено впервые**. Хорошее впечатление оставляет список публикаций соискателя. Хотя работ немного (но вполне достаточно для соискания степени доктора), но все результаты опубликованы в высоко-рейтинговых международных и российских журналах в области теоретической гидромеханики и теоретической физики вообще (Physics of Fluids, Physical Review Fluids, Письма в ЖЭТФ, Journal of Experimental and Theoretical Physics и т.д.). Официальный оппонент также придерживается принципа «лучше меньше,

да лучше». Процесс рецензирования в этих журналах достаточно жесткий и состоит из нескольких этапов. Новизна результатов проходит всестороннюю проверку. Это подчеркивает **научную новизну** полученных в диссертации результатов. В частности, впервые исследовано влияние поверхностной плёнки на генерацию поверхностными волнами вихревых течений, в рамках квазианалитической теории получены простые и элегантные соотношения. Впервые изучено взаимное влияние ансамбля инерционных волн и среднего геострофического вихревого течения. Определенный интерес представляет также изучение связи разноточечных корреляционных функций пассивного скаляра со статистикой градиента поля скорости.

На мой взгляд, наиболее сильные результаты представлены соискателем в главе 2. Возможно, это связано с научными интересами оппонента, настаивать на этом утверждении не буду. Тем не менее, хочется отметить, что задачи механики жидкости с динамической межфазной границей относятся к топовым по трудности их рассмотрения. Теоретическое описание динамики жидкости, граничное условие для которой представлено подвижной межфазной границей, на которой живет отдельная поверхностная фаза, является очень проблемным разделом гидромеханики. Аналитических результатов для общего случая здесь практически нет, основным инструментом исследования остаётся прямое численное моделирование. Последнее, кстати, также является нетривиальным, если граница свободно деформируется. Как отмечено выше, автору удалось предложить достаточно простую теоретическую модель жидкой плёнки, которая, тем не менее, сохраняет определенную общность свойств таких систем. Модель оказалось достаточно простой, чтобы в рамках неё можно было бы получить ряд аналитических результатов. Я согласен с амбициями автора в том, что эти результаты, например, описание вихревых течений, вызванных затуханием поверхностных волн в присутствии поверхностной плёнки, могут войти в учебники по физико-химической гидродинамике. Всё сказанное выше составляет высокую **теоретическую значимость** диссертационной работы.

Отметим и высокую **практическую значимость** работы. Решаемые соискателем задачи включают в себя как глобальные вопросы (геострофические течения наблюдаются в атмосфере, жидкие плёнки оказывают существенное влияние на мировой океан и т.д.), так и вопросы сугубо прикладного порядка. К последним относятся вопросы конструирования микроскопических смесителей в интересах химического и биотехнологического производства. Решение задач с жидкой плёнкой весьма полезны для металлургического производства (например, плавка титана в закрытых реакторах), управления процессами переноса в интересах фармацевтических производств и т.д.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается сравнением теоретических предсказаний с имеющимися в наличии экспериментальными данными, с точными решениями в предельных случаях, с известными теориями в области их применимости и прямыми численными расчетами, а также обоснованностью физических представлений, положенных в основание предлагаемых моделей, использованием апробированных методов

исследований. Также обоснованность положений и выводов, сделанных на основе проведенных исследований, обеспечивается их непротиворечивостью имеющимся литературным данным и современным научным представлениям. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 печатных работах в изданиях, индексируемых МБЦ, в журналах из списка ВАК. Результаты докладывались и обсуждались на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня.

Диссертационная работа Вергелеса С. С. не лишена недостатков, в некоторых местах рождает желание подискутировать.

1. На мой взгляд автор должен более аккуратно рассмотреть вопрос об адресации его модели «жидкой плёнки» по отношению к конкретной физической системе. Автор ни разу не использует в своей диссертации общепринятый в физхимии термин *монослой*, и это, на мой взгляд, правильно. Монослой Ленгмюра (в случае нерастворимости ПАВ) или Гиббса (если ПАВ растворим в жидкости) образуется при выходе молекул ПАВ на межфазную поверхность в силу более выгодного энергетического расположения там. Для описания удивительных свойств монослоя в своё время Гиббс ввёл в математическую физику понятие поверхностной фазы, для которой отдельно записывается уравнение переноса. В последние годы было экспериментально показано, что диффузия ПАВ внутри поверхностной фазы значительна и играет принципиальную роль во многих динамических явлениях в жидкостях с межфазной границей и наличием ПАВ. Этот вопрос обсуждается в работах, которые автор цитирует [93,97] и в некоторых других, которые не цитирует. На самом деле этот вывод сейчас выглядит вполне логичным, так как типичный монослой имеет толщину не более размера одной молекулы, то есть не более нескольких нанометров. Если концентрация ПАВ на поверхности невелика, то молекулы активно перемещаются по поверхности. Если велика, то начинаются поверхностные фазовые переходы. Между тем, модель «жидкой плёнки», которую развивает автор, явно постулирует отсутствие такой диффузии (см. формулу (1.8)). Смущает то, что автор постоянно апеллирует в тексте именно к плёнкам ПАВ, которые правильнее называть монослоями. Например,

«Это означает, что поверхностная плёнка является результатом процесса адсорбции поверхностно-активных молекул из воздуха, которые захватываются поверхностью воды вследствие её большой диэлектрической проницаемости.» (стр. 26)

«Плёнка является результатом адсорбции поверхностно активных молекул из воздуха лаборатории.» (стр. 27)

«Мы рассматриваем модель плёнки, которая образована поверхностно-активным веществом, растворением которого в жидкости можно пренебречь.» (стр. 33)

На мой взгляд эти высказывания неверны. Автор должен шире взглянуть на применимость своей модели. Например, для мирового океана актуальны так называемые «поверхностные плёнки», которые имеют толщину от долей миллиметра до сантиметров. Они включают всевозможную мертвую органику, микроорганизмы, остатков деятельности человека, разливы нефти и т.д. Точно также такие плёнки вполне могут создаваться искусственно с помощью большого числа лёгких плавающих микроскопических шариков – такие синтетические системы сейчас активно исследуются, у этой системы много технологических приложений. Например, большой проблемой при плавке титана в закрытых батч-реакторах является паразитная окалина, которая выходит на поверхность жидкого металла и существенно меняет условия плавки. Свойства этой плёнки изучены плохо, так как процесс плавки идет в закрытом реакторе при больших температурах. Но металлурги хотят узнать об этой плёнке как можно больше. Очень актуальна задача разработки теоретической модели такой плёнки, чтобы препятствовать её образованию. Во всех случаях граничные условия для скорости на поверхности жидкости существенно меняют свой вид.

Во этих примерах выше речь явно идёт не о слоях ПАВ толщиной в нанометр. Вполне вероятно, диффузию вещества в указанных выше макроплёнках вполне можно не рассматривать и теоретическая модель автора отлично будет описывать свойства таких плёнок.

2. Следующее замечание не имеет прямо отношения к результатам диссертации, но, тем не менее, стоит отметить, что процесс адсорбции-десорбции автор понимает явно поверхностно. Выше приведены цитаты, где утверждается, что молекулы ПАВ поступают из воздуха. Это, конечно, может случиться, но в таких мизерных количествах, что вряд ли будет иметь последствия. Именно вода, а не воздух, является тем удивительным резервуаром, который собирает всевозможную органическую грязь. Происходит это, как правило, при контакте воды с различными твердыми поверхностями, куда жидкость заливается (клей, остатки жира на стенках и т.д.). Первое, что должен сделать экспериментатор для того, чтобы избежать присутствие неконтролируемых ПАВ в воде, – это провести многоуровневую длительную очистку воды.
3. Автор неоднократно отмечает в диссертации, что в ряде задач гидромеханики существует проблема выделения малого параметра. Между тем, для описания процессов в этих задачах необходимо их ранжировать по характерным временам протекания. В связи с эти у

оппонента возник следующий вопрос. В теоретической физике хорошо известен метод многих временных масштабов, который может применяться как к точечным, так и пространственно-распределенным физическим системам. Причем, малый параметр в методе вводится формально, часто его даже нет нужды конкретизировать, иногда его смысл проявляется в ходе решения задачи. Метод позволяет построить иерархию времен и разложить движения на быстрые и медленные. Например, с помощью этого метода находят медленные многообразия в теории бифуркаций или усредненные крупномасштабные движения в среде при наложении на гидродинамическую систему высокочастотных вибраций. Автор диссертации во введении резонно описывает трудности с описанием разномасштабных явлений в рамках одной системы. Но при этом нигде не использует в своём анализе наиболее популярный среди теоретиков инструмент исследования таких систем. С чем это связано?

4. Одно из центральных понятий в диссертационной работе – инерционные волны и их взаимодействие с геострофическим течением. В качестве модельной рассматривается замкнутая кубическая кювета. В такой системе инерционные волны действительно играют большую роль в перераспределении энергии вращающейся системы – они многократно отражаются от стенок кюветы. В принципе, в такой ситуации возможно даже образование аттракторов. Опираясь на эту конфигурацию, автор получил много интересных результатов. Вопрос в том, можно ли эти результаты автоматически перенести на более глобальные системы (например, атмосфера), где непосредственно стенок сосуда нет, а значит и влияние инерционных волн будет гораздо слабее. Не мог бы автор пояснить, какие из его результатов жестко привязаны к модели геострофического куба с вращением (надо заметить, весьма умозрительной), а какие все таки имеют более широкое трактование и применение?
5. Понятно, что транспорт пассивного компонента (по терминологии автора – скаляра) в среде – это мечта теоретика. Он вроде есть, но на самом деле ни на что не влияет. По-сути, это сама среда и есть, просто мы умеем часть её метить. К сожалению, в жизни таких подарков почти не бывает. Какую роль играет пассивность скаляра в анализе главы 4? Что изменится, если допустить какую-нибудь обратную связь между скаляром и скоростным полем в среде? Насколько усложнится анализ, если рассмотреть задачу в приближении слабой обратной связи?

Диссертация написана на правильном русском языке с минимумом грамматических ошибок. Хотя некоторое количество опечаток присутствует.

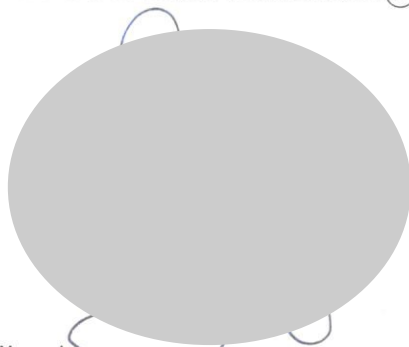
Отмеченные недочеты не снижают научной значимости представленной диссертационной работы и высокого квалификационного уровня диссертанта. В целом диссертация является законченной научно-квалификационной работой,

выполненной соискателем самостоятельно. В диссертации приведены результаты, позволяющие их квалифицировать как решение серии актуальных научных задач, имеющих существенное значения для развитие теоретических подходов и методов в области физической гидродинамики. Достоверность основных представленных в работе результатов не вызывает сомнений. Текст автореферата и диссертации, а также выполненные публикации полностью отражают суть работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика». Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и от 12.10.2018 № 1168), а её автор **Вергелес Сергей Сергеевич** достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент,

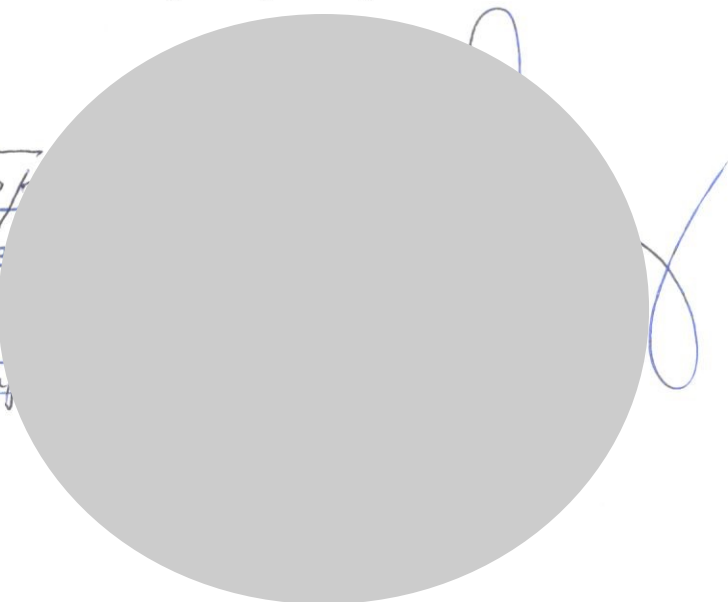
Доктор физ.-мат. наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, 2010 г.), доцент, заведующий кафедрой «Прикладная физика» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

614990, Пермский край, г. Пермь, ул. Профессора Поздеева, 11, корпус В, к. 120. Тел.: +7(342) 239-14-14 E-mail: DABracun@pstu.ru



Брацун Дмитрий Анатольевич
22.04.2025

Я, Брацун Дмитрий Анатольевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



/Д.А. Брацун /

Подпись

Учёный сек
Учёного сое

«23» а