

УТВЕРЖАЮ»

директора

фических наук

ов Р. В.

ноября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»
о диссертационной работе Ивченко Николая Александровича
«Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря»,
представленной на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Диссертационная работа Ивченко Николая Александровича посвящена теоретическому изучению характеристик переноса полей внутри когерентного вихревого течения, формирующегося в турбулентном потоке. В рамках этой темы в качестве конкретных задач были выбраны исследование перемешивания пассивной примеси в потоке двумерного когерентного вихря и изучение распространения инерционной волны в течении геострофического вихря во вращающейся системе и взаимодействия его с волнами.

Исследование взаимодействия между волнами и средним течением относится к фундаментальным проблемам гидродинамики и играет определяющую роль в понимании и моделировании атмосферных и океанических потоков, сохраняющихся продолжительное время. Рассмотренное в диссертации описание инерционных волн в геострофическом течении представляет интерес не только как пример задачи о передаче энергии среднему течению; оно имеет прикладное значение при интерпретации результатов экспериментов. Построенная в работе на основе этого механизма статистическая теория, определяющая профиль скорости вихря за счет поглощения падающих волн, была непосредственно применена к описанию данных измерений в опытах по вращающейся турбулентности. В исследовании перемешивания пассивного скаляра также получены содержательные выводы о возможности изучения статистики скорости самого турбулентного вихревого течения таким способом. Изложенное выше свидетельствует об **актуальности** темы и **научной значимости результатов** работы Ивченко Н.А.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и пяти приложений. Полный объём диссертации составляет 171 страницу, включая 20 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 170 наименований.

Во **введении** аргументирована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, положения, выносимые на защиту, обоснована ее научная новизна. Представлены сведения об апробации результатов работы и показана их теоретическая и практическая значимость.

Первая глава носит вводный характер и является обзором литературы. В начале приводятся необходимые сведения по турбулентной гидродинамике во вращающейся системе отсчета: с теоретической стороны рассматриваются характерные для нее течения, инерционные волны и вихревые колонны, после чего переходят к описанию режима вращающейся турбулентности. Приводится обзор ее моделирования в численном счете и наблюдений в экспериментальных условиях. Излагается теория геострофического вихря на основе предложенной другими авторами модели, в которой его поток поддерживается мелкомасштабной стохастической силой с однородной статистикой. В заключение главы по теме переноса пассивного скалярного поля детально разобрана теория его перемешивания в бэтчелоровском режиме изотропной турбулентности.

Во **второй главе** проводится исследование мелкомасштабного перемешивания пассивной примеси двумерным турбулентным течением, в котором можно выделить постоянную сдвиговую компоненту на фоне слабых гладких флуктуаций. Изучение начинается со статистики близких лагранжевых траекторий в данном потоке, которая определяет динамику скалярной примеси в отсутствие диффузии. Охарактеризована анизотропия, вносимая сильным сдвигом, и показана симметрия общего характера в статистике разбегания траекторий. Также найдены аналитически параметры и численная аппроксимация для функции плотности вероятности в модели с флуктуациями, коротко коррелированными во времени. После этого устанавливаются статистические свойства размешивания и диффузии пассивного скаляра: вычислено поведение одноточечных моментов, пространственная зависимость у парной корреляционной функции, а у корреляционных функций высоких порядков – отдельно вблизи максимума в коллинеарной геометрии. Рассмотрены задача о распаде начального распределения скаляра и задача о стационарной накачке системы флуктуациями скалярного поля. Среди прочего была показана связь между парной корреляционной функцией в задаче распада и плотностью вероятности в задаче разбегания лагранжевых траекторий, что позволяет устанавливать статистические характеристики такого турбулентного потока через перемешивание примеси.

В **третьей главе** изучается взаимодействие инерционной волны с течением геострофического вихря. Выведены уравнения динамики волны в цилиндрической геометрии, описывающие ее распространение на фоне стационарного осесимметричного вихря. В невязком пределе показано, что монохроматическая волна создает момент сил, действующий на среднее течение, только при достижении своего критического слоя; в противном же случае происходит ее отражение от вихря. Определяются условия для поглощения инерционной волны в критическом слое, после чего проводится ее локальное рассмотрение вблизи точки отражения и слоя; для анализа выполнен переход к модели с прямыми линиями

тока в их окрестности. С учетом влияния вязкости были описаны динамика и эффективность поглощения инерционной волны в критическом слое. Так, для динамики квазимонохроматического волнового пакета уточнены предсказания общей теории касательно его ширины и показано сохранение величины, имеющей смысл волнового действия, при его расплывании.

В **четвертой главе** развивается теоретическая модель, определяющая радиальный профиль средней скорости в когерентном геострофическом вихре. Предполагается, что его течение поддерживается за счет описанного механизма поглощения случайным ансамблем коротких инерционных волн, которые возбуждаются на периферии системы и сходятся к вихрю. На основе найденных условий поглощения, в модели был определен поток момента импульса, который вихрь получает от падающих волн в пределе малой вязкости. Это замыкает уравнение Рейнольдса для среднего течения: сформулированная квазилинейная теория оказывается существенно нелокальной. Для сравнения с данными эксперимента применяются приближения модели, сводящие уравнение к обыкновенному дифференциальному. Его численное решение успешно сопоставлено с профилями угловой скорости циклонов, измеренными при разных скоростях вращения установки. В завершение главы приведено краткое обсуждение результатов и границ применимости теории.

Основные результаты представленной на защиту диссертации изложены в последних трех главах и кратко сформулированы в ее **заключении**. Их **достоверность** обеспечивается как контролем точности использованных аналитических методов, так и сравнением с работами других авторов, а также данными натурных и численных экспериментов.

По содержанию и оформлению диссертации имеется несколько вопросов и замечаний:

1. В исследовании пассивного скаляра теория ограничивается его мелкомасштабным перемешиванием в сдвиговом течении. Применительно к течению когерентного вихря, какими размерами будет ограничиваться перемешивание примеси, чтобы можно было проверить найденные в модели результаты?
2. Среднее течение циклона численно определялось через решение уравнения Рейнольдса после приближений в модели, формула (4.35), в области вне сердцевины, где доминирует трение о дно, а вязкое трение пренебрежимо мало по сравнению с ним. Что препятствовало учету вязкой диссипации в уравнении для среднего течения и продолжению решения в направлении оси вихря?
3. У Рис. 3.3 на с. 109 отсутствуют обозначения единиц измерения на графике. При этом подпись оси ординат v не соответствует действительности – отложена $Re\ v$ у комплексного решения (3.46), как указано в описании графика.
4. В тексте диссертации встречаются опечатки, например, в определении масштаба Земана $k_\Omega = \varepsilon^{-1/2}\Omega^{3/2}$ в литературном обзоре неправильно записан показатель степени.

Приведенные замечания имеют дискуссионный и методический характер и не снижают научной ценности работы. Диссертация Ивченко Н.А. является оригинальным научным исследованием, **новизна** результатов и **обоснованность** выводов которого не вызывают сомнений. Результаты диссертации докладывались

на семинарах и научных конференциях и опубликованы в трех рецензируемых работах в рецензируемых научных журналах *Physics of Fluids*, *Physical Review E*, *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Доклад Ивченко Н.А. по теме диссертационной работы был заслушан и обсужден на семинаре Лаборатории морских течений ИО им. П.П. Ширшова РАН 14.10.2026 г.

Диссертационная работа Ивченко Н.А. «Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. в действующей редакции. Автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. – «Теоретическая физика».

Отзыв составлен главным научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, руководителем Лаборатории морских течений, профессором, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Жмуром Владимиром Владимировичем

Жмур В.В.

«17» ноября 2026 г.

подпись В.В. Жмура заверяю
заместитель директора по [illegible] работе
А.А. Осад[illegible]