ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Ерманюка Евгения Валерьевича
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».

Актуальность диссертационной работы

В турбулентных течениях в результате нелинейного взаимодействия могут самопроизвольно формироваться когерентные структуры – крупномасштабные упорядоченные движения, часто принимающие форму вихрей, сохраняющихся длительное время на фоне флуктуаций. В геофизических течениях атмосферы и океана такие структуры, включая циклоны, антициклоны и крупные вихри, существенно влияют на крупномасштабный перенос тепла, влаги и примесей. Ключевым фактором, который определяет динамику долгоживущих когерентных структур в гидродинамических системах, является их взаимодействие с мелкомасштабными турбулентными пульсациями и волнами.

В диссертационной работе Н.А. Ивченко указанная проблема рассматривается применительно к вихревым колоннам во вращающейся турбулентности, которые возникают вследствие квазидвумеризации течения и установления обратного каскада энергии. Поскольку такие геострофические вихри задают крупномасштабную динамику потока, актуальны исследование их пространственной структуры и выяснение механизмов их поддержания. Цель диссертации заключалась в теоретическом изучении взаимодействия геострофического вихревого течения с инерционными волнами и его роли в поддержании вихрей, а также в статистическом исследовании перемешивания пассивного скаляра в модели случайного потока внутри двумерного когерентного вихря. Последняя задача представляет интерес для геофизической гидродинамики и теории двумерной турбулентности в неоднородных вихревых течениях.

Общая характеристика работы

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

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы, положения, выносимые на защиту, обоснованы новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе представлен обзор литературы по темам исследования. В нем выделяются два основных направления. Первое посвящено гидродинамике во вращающейся системе отсчета и вращающейся турбулентности. Рассматриваются характерные для нее эффекты и потоки: трехмерные инерционные волны и квазидвумерные геострофические течения. Излагаются результаты экспериментальных и численных исследований, а также известная теоретическая модель геострофического

вихря, поддерживаемого турбулентными пульсациями, которые возбуждаются случайной силой с однородной по пространству статистикой. Второе направление охватывает теорию переноса пассивного скалярного поля в изотропной турбулентности, в частности особенности его перемешивания в бэтчелоровском режиме.

Во второй главе исследуется перемешивание пассивного скалярного поля в двумерном потоке, состоящем из сильной сдвиговой компоненты и наложенных на нее слабых случайных флуктуаций, моделирующем структуру поля скоростей внутри когерентного вихря. Сначала рассматривается статистика разбегания близких лагранжевых траекторий и обусловленная сдвигом анизотропия: устанавливаются общие свойства плотности вероятности для лагранжева растяжения, включая симметрию, и получаются аналитические и численные результаты для модели с белым шумом флуктуаций течения. Далее исследуются статистические характеристики пассивного скаляра в задачах затухания начального распределения и непрерывной накачки, включая моменты и пространственные корреляционные функции различных порядков. В частности, устанавливается связь между статистикой лагранжевого растяжения и парной корреляционной функцией скаляра, а также выявляется анизотропный аналог каскада Бэтчелора.

В третьей главе исследуется распространение и взаимодействие инерционной волны с когерентным геострофическим вихрем. Выводятся и анализируются линейные уравнения динамики волны в цилиндрической геометрии на фоне стационарного осесимметричного течения. В невязком пределе показано, что монохроматическая волна не создает момента сил, действующего на вихрь, пока не достигнет своего критического слоя, где сходящаяся волна поглощается, отдавая среднему течению момент импульса и энергию; в противном случае волна отражается от вихревого течения без обмена ими. Установлены условия отбора волн, способных поглощаться вихревым течением: показано, что они несут вертикальный момент импульса того же знака, что и у вихря. Далее построено локальное описание отдельно для отражения короткой инерционной волны и ее поглощения вблизи критического слоя с учетом вязкости: рассмотрены решение для монохроматической волны и динамика волнового пакета.

В четвертой главе строится теоретическая модель сформировавшегося среднего течения в осесимметричном геострофическом вихре, поддерживаемом ансамблем случайных инерционных волн, которые возбуждаются на периферии системы и распространяются в направлении вихря. Рассмотрение отдельной инерционной волны на фоне вихревого течения в коротковолновом пределе продолжена на статистическое описание ансамбля волн. На основе механизма поглощения в критическом слое выводится поток момента импульса, передаваемый вихрю падающими волнами. Полученное в рамках квазилинейной теории уравнение Рейнольдса для среднего течения оказывается нелокальным: отбор волн, вносящих вклад в напряжение в данной точке, определяется поведением профиля скорости вихря на бóльших радиусах. Для описания экспериментальных данных по циклонам применяются приближения модели, сводящие уравнение к обыкновенному дифференциальному. Затем его численное решение сопоставляется с профилями угловой скорости циклонов, измеренными при разных

скоростях вращения установки. Это позволяет проверить предложенный механизм поддержания вихря в турбулентном течении. В конце главы представлено заключение с кратким обсуждением результатов и применимости теории.

В заключении кратко сформулированы выводы по результатам диссертационной работы.

Научная и практическая значимость представленных результатов диссертации заключается в первую очередь в применимости теории к интерпретации экспериментальных наблюдений и данных прямого численного моделирования вращающейся турбулентности. Разработанная теория связывает наблюдаемый профиль скорости вихря с параметрами накачки и скоростью вращения системы, что позволяет оптимизировать условия проведения экспериментов. Результаты исследования перемешивания пассивного скаляра создают теоретическую основу для методов изучения статистических характеристик скорости течения внутри когерентного вихря по измерениям корреляций примеси. Теоретическая значимость работы заключается в описании взаимодействия вихря с инерционными волнами вместе с представленным механизмом поддержания геострофического вихря, а также в установлении общих закономерностей мелкомасштабной статистики пассивного скаляра в случайном потоке двумерного вихря.

Достоверность, степень обоснованности и научная новизна полученных автором диссертации результатов и положений, выносимых на защиту, не вызывают сомнений. Текст написан ясным языком и сопровождается большим количеством ссылок на литературу и предшествующие работы в этой области. Также имеется несколько приложений, в которых приведены дополнительные детали вычислений. Все выносимые на защиту научные положения и выводы подробно обоснованы с корректным применением аналитических методов. Результаты находятся в соответствии с более ранними исследованиями других авторов; часть теоретических результатов получила подтверждения в натурных и численных экспериментах. Основные положения работы опубликованы в авторитетных научных изданиях, рекомендованных ВАК: Physical Review E, Physics of Fluids и «Журнал экспериментальной и теоретической физики».

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. В Главе 3 недостаточно подробно освещен вопрос об обратной передаче момента импульса от вихря к волне. По каким соображениям им пренебрегли в приложении построенной в Главе 4 теории при описании экспериментальных наблюдений?
2. Поглощение монохроматической волны непосредственно на радиусе ее критического слоя является идеализацией невязкого приближения – при конечной вязкости оно происходит в некоторой окрестности этого радиуса. Насколько широка эта область в условиях рассматриваемого эксперимента и можно ли считать критический слой локализованным для типичных волн?
3. Диссертация содержит ряд опечаток и неточностей. К примеру, формулы каскадов Обухова (1.47) и Бэтчелора (1.48) для пассивного скаляра в обзоре записаны для

спектральной плотности флуктуаций, а не их парной корреляционной функции, как следует из обозначений.

Сделанные замечания не снижают достоинств диссертации. Ее результаты прошли апробацию на научных семинарах, научных школах и конференциях.

Доклад Н.А. Ивченко по теме диссертационной работы был заслушан и обсужден на семинаре «Прикладная гидродинамика» 11.11.2026 г. в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.

Заключение

Диссертационная работа «Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря» является завершенным научным исследованием и соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Николай Александрович Ивченко, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

Доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
главный научный сотрудник Лаборатории экспериментальной прикладной гидродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинами[illegible]А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук,

Ерманюк Ев[illegible] «24» ноября 2026г.

Подпись Е.В. Ерманю[illegible]
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН,
к.ф.-м.н. _____ Ермишина Виктория Евгеньевна

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) 333-26-65
факс: (383) 333-16-12
адрес электронной почты: ermanyuk@hydro.nsc.ru