

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Института теоретической

физики им. Л.Д. Ландау РАН

до

В. Колоколов

ВЫПИСКА

из протокола заседания Сектора физики неравновесных состояний
Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН
16 сентября 2026 г.

(Заключение о диссертации Ивченко Н.А.
«Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря»
по месту её выполнения)

СЛУШАЛИ: Доклад Ивченко Н.А. по диссертации «Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика».

ПОСТАНОВИЛИ: Принять следующее заключение о диссертации Ивченко Н.А.
«Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря».

В диссертационной работе Ивченко Н.А. изучаются характеристики адвекции когерентным вихревым течением полей различной природы, включая скалярное поле и поле инерционной волны. Для инерционных волн проводится построение статистической теории их взаимодействия с геострофическим вихрем во вращающейся турбулентности.

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

В Первой главе диссертации приводится обзор литературы по темам исследования. Излагаются характерные черты гидродинамики во вращающейся системе отсчета: с теоретической стороны рассматриваются такие явления, как вихревые колонны, инерционные волны и эффект Экмана, которые непосредственно связаны с содержанием работы. Рассматриваются различные течения, реализующиеся во

вращающейся турбулентности, с примерами их наблюдения в экспериментах или в численном счете. Подробно разбирается построенная в других работах модель когерентного столбового вихря, который поддерживается турбулентным потоком, создаваемым стохастической силой с коротковолновой однородной и изотропной статистикой, в случае неограниченной системы при малых числах Россби. Результаты в этой модели служат основой и точкой для сравнения в исследованиях, представленных в этой работе. В заключение главы дается введение в тему переноса пассивного скалярного поля и детально представлена теория его перемешивания в бэтчелоровском режиме. Изложенные результаты используются далее при переходе к анизотропному сдвиговому течению, рассмотренному в диссертации.

Во Второй главе проводится исследование перемешивания пассивного скаляра двумерным течением, которое складывается из сильной сдвиговой компоненты и относительно слабых гладких флуктуаций, случайных во времени. Сначала изучается динамика близких лагранжевых траекторий в данном течении: описывается их разбегание с апериодическими проворотами соединяющего их вектора и выводится эффективная ланжевеновская система в присутствии сильного сдвига. После перемасштабирования вдоль направления потока исследуются остаточная анизотропия и статистика разбегания, что задается функцией Крамера: устанавливаются ее общие свойства, после чего в модели с коротко коррелированными флуктуациями вычисляется ее численная аппроксимация и находятся аналитические характеристики для углового распределения и экспоненты Ляпунова. Далее разбирается задача о распаде скаляра: вычисляются одноточечные моменты, находится пространственная зависимость парной корреляционной функции и характеризуются корреляционные функции высших порядков вблизи максимума в коллинеарной геометрии. Отдельно устанавливается связь парной корреляционной функции с функцией Крамера на масштабах выше диффузионного. Следом эти же статистические характеристики находятся для задачи с непрерывной накачкой, установившееся состояние в которой описывается как совокупность вкладов от внешнего источника, произведённых в разные моменты времени. В частности, исследуется отклонение статистики моментов флуктуаций пассивного скаляра от гауссова распределения и находится анизотропный аналог каскада Бэтчелора. В частности, исследуется отклонение статистики моментов флуктуаций пассивного скаляра от гауссова распределения и находится анизотропный аналог каскада Бэтчелора. В конце главы представлено заключение, где суммируются и анализируются полученные результаты.

В Третьей главе строится теория взаимодействия инерционной волны с течением геострофического вихря. Выводятся и анализируются уравнения динамики волны в цилиндрической геометрии для описания ее распространения на фоне стационарного осесимметричного вихря. В невязком пределе показано, что монохроматическая волна не создает момента сил, действующего на вихрь, пока не достигнет своего критического слоя: сходящаяся волна либо поглощается в нем, отдавая среднему течению момент импульса и энергию, либо отражается от вихревого течения без передачи. Далее проводится локальное рассмотрение волны вблизи точки отражения и критического слоя; для анализа выполнен переход к модели с прямыми линиями тока в их окрестности. Следующая часть главы посвящена окрестности критического слоя с учетом вязкости, где рассматриваются как монохроматическая волна, так и

динамика волнового пакета. Наконец, в заключении главы обсуждаются результаты этой части исследования.

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. Рассматривается распространение отдельной инерционной волны на фоне осесимметричного вихря: приводится общее описание ее профиля в коротковолновом пределе. Далее задаются статистические свойства ансамбля на периферии; в его разложении выделяются сходящиеся цилиндрические гармоники, определяющие передачу энергии и момента импульса геострофическому вихрю. На основе механизма поглощения в критическом слое выводится поток момента импульса, получаемый вихрем от падающих волн: обсуждаются правила отбора волн, способных передавать этот поток. Это замыкает уравнение на среднее течение, в котором напряжение Рейнольдса определяется вкладом от азимутальных гармоник ансамбля с числом $|m| \leq m_*$, не испытывающих отражения перед поглощением. Сформулированное уравнение Рейнольдса оказывается нелокальным: отбор волн, вносящих вклад в напряжение в данной точке, определяется поведением профиля скорости вихря на больших расстояниях. 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 отмечены основные результаты исследования и выражены благодарности.

Основные результаты диссертации были изложены в 3 публикациях в изданиях из списка ВАК:

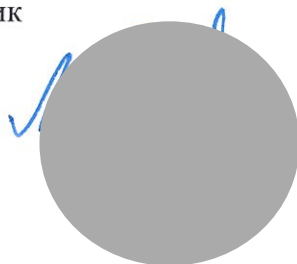
- [1] Н.А. Ивченко, С.С. Вергелес. Статистика пассивного скаляра в двумерном сдвиговом течении с флуктуациями. ЖЭТФ 163(5), 724–733 (2023)
- [2] N.A. Ivchenko, V.V. Lebedev, and S.S. Vergeles. Mixing in two-dimensional shear flow with smooth fluctuations. Physical Review E 110(1), 015102 (2024)
- [3] N.A. Ivchenko, S.S. Vergeles. Absorption and reflection of inertial waves by a geostrophic vortex. Physics of Fluids 37(12), 126605 (2025)

Основные результаты работы докладывались на XXIII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2023 г.), школа-конференция «Современная гидродинамика 2023», «Современная гидродинамика 2024», «Современная гидродинамика 2026» (г. Черноголовка), XXI научной школе «Нелинейные волны — 2024» (г. Нижний Новгород, 2024 г.).

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 Ивченко Н.А. удовлетворяет всем требованиям ВАК, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук.

На основании вышеизложенного Сектор физики неравновесных состояний ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН рекомендует диссертацию Ивченко Н.А. «Перенос полей в турбулентном течении когерентного вихря» 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



Лебедев В.В. «16» сентября 2026г.