

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук, профессора Петросяна Аракела Саркисовича на диссертацию Копьева Алексея Викторовича «Исследование статистических свойств тензора градиентов скорости в изотропном несжимаемом турбулентном потоке», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика»

Диссертационная работа Копьева Алексея Викторовича посвящена развитию теории несжимаемых изотропных турбулентных течений, исследование фундаментальных свойств гидродинамической турбулентности проводится аналитическими методами на основе уравнений Навье-Стокса, что выгодно отличает рецензируемую работу от многочисленных публикаций, основанных на феноменологических гипотезах, а также на размерных и симметричных соображениях. Именно генетическая связь полученных результатов с уравнениями динамики жидкости определяет актуальность проведенного исследования. Специально отмечу актуальность и своевременность полученных в диссертации результатов в смежных областях физики, например в теории турбулентного динамо и в исследованиях астрофизической турбулентности.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 105 наименований, а также включает одно приложение.

Во введении к диссертации Копьева А.В. излагается современное состояние проблемы изучения изотропных течений несжимаемой жидкости, сформулированы задачи и цели работы, обсуждается ее актуальность, новизна и практическая значимость.

В первой главе диссертации исследуются статистические свойства тензора скоростей деформации в изотропной турбулентности. Используя качественные соображения, делается вывод о зависимости статистики тензора от трех независимых инвариантов вращения, а именно, максимальное и минимальное собственное значение тензора, и след куба тензора, а также получены аналитические выражения связывающие функции распределения компонент тензора с различными инвариантами вращения в произвольном статистически изотропном потоке. Автор впервые понял важную роль якобиана преобразования от компонент тензора скоростей деформации к его собственным значениям при исследовании изотропной турбулентности. На этой основе получены весьма содержательные результаты о вырожденности обратимой статистики в инвариантах, а также найдены распределения инвариантов тензоров в случае гауссового поля скоростей. Полученные аналитические результаты Копьева А.В. дополнили важным и честным анализом статистики тензора скорости деформации используя существующие данные численного моделирования. Анализируя результаты численного исследования, Копьев А.В. предложил новую линейную комбинацию инвариантов, от которой зависит функция распределения вследствие необратимости турбулентной статистики в результатах моделирования. В этой главе введен новый параметр, характеризующий выражения инвариантов функции распределения и делается важная интересная гипотеза об универсальности этого параметра. Показано, что в случае малоинтенсивных турбулентных пульсаций присутствует обратимая статистика, которая, возможно, связана с гауссовостью крупномасштабных пульсаций скорости. Кроме того найдена и исследована двухпараметрическая логнормальная аппроксимация статистических свойств тензора скоростей деформаций.

Во второй главе диссертации сделан важный шаг в использовании модели вытягивающихся вихрей для турбулентных течений. Используя линейный механизм вытягивания интенсивных филаментов, Копьёв А.В. построил лагранжеву стохастическую модель возникновения вихревых структур в инерционном интервале турбулентности. В главе получены уравнения Лиувилля, описывающие крупномасштабную завихренность. Обосновано и показано, что стохастической силой в такой модели является крупномасштабный тензор скоростей деформации. Используя модель Ланжевена с такой внешней силой, предположение о гауссовости и дельта-коррелированности флуктуаций, Копьёв А.В. получил замкнутые уравнения для корреляторов, характеризующих пируэт-эффект в турбулентных течениях и исследовал асимптотическое поведение этих корреляторов. Полученные в главе результаты сравниваются с имеющимися данными экспериментов и с имеющимися результатами численного моделирования, показано удовлетворительное согласие.

В третьей главе диссертации получены новые нетривиальные корреляторы в изотропной турбулентности. Речь идет о развитии колмогоровского закона «четырёх пятых». Найдена связь трехточечного коррелятора скорости и найдена связь членов его разложения по малому вектору, соединяющему две из трех точек, со смешанными двухточечными третьими корреляторами скорости и градиентом скорости. Получены новые точные законы «восьми пятнадцатых» локально изотропной турбулентности для двух конкретных смешанных корреляторов первого порядка. Используя существующие расчеты изотропной турбулентности показано, что остальные смешанные корреляторы первого порядка в инерционном интервале выражаются через константу Колмогорова, описывающую скорость диссипации энергии.

В заключении сформулированы основные выводы работы.

В целом диссертационная работа Копьёва А.В. представляет законченное исследование в области теоретической физики, полученные результаты актуальны и удовлетворяют требованиям новизны, а также имеют возможности для важных применений. Выносимые на защиту результаты достоверны и обоснованы. Результаты диссертации опубликованы в российских и международных журналах, рекомендованных ВАК, индексируемых в международных базах данных, представлены на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Диссертационная работа содержит целый ряд результатов важных для понимания явления турбулентности и процессов переноса пассивных скаляров и векторов в турбулентных течениях, она написана интересно, однако не лишена отдельных недостатков, число которых, впрочем, минимально. В качестве замечаний и пожеланий можно отметить следующие:

1. Во второй главе диссертационной работы автор предложил линейную стохастическую модель крупномасштабной завихренности (уравнение 2.9). Это уравнение представляет собой уравнение с мультипликативным шумом и допускает подробный теоретический анализ. В диссертационной работе такой анализ основывается на предположении о гауссовости и дельта-коррелированности крупномасштабного тензора скоростей деформации, что позволило получить замкнутые уравнения для корреляторов, характеризующих пируэт-эффект. Однако, по моему мнению следовало бы обсудить пределы применимости сделанных предположений и потенциальные возможности выхода за их рамки. Например,

интересно было бы понять влияние конечного времени корреляции случайной силы, а так же роль негауссовости.

2. Уравнение 2.9 второй главы, вследствие мультипликативности внешней силы, обеспечивает логнормальность решения уравнения для завихренности, а, стало быть, вполне определенное поведение корреляционных функций высокого порядка для величин, характеризующих пируэт-эффект. Было бы важно обсудить роль таких корреляторов в понимании пируэт-эффекта.

Однако, сделанные замечания не имеют принципиального характера и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы Копьёва А.В.

Диссертационная работа Копьёва Алексея Викторовича отвечает всем требованиям, предъявленным ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, а ее автор Копьёв Алексей Викторович заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

Заведующий сектором

теоретических исследований ИКИ РАН,

д.ф.-м.н., профессор

Петросян Аракел  
Саркисович

ИКИ РАН, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, тел. +74953335478, e-mail:  
[apetrosy@iki.rssi.ru](mailto:apetrosy@iki.rssi.ru)

Подпись Петросяна Аракела Саркисовича заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН

к.ф.-м.н.



Садовский Андрей  
Михайлович

21 января 2019 г.