

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова  
доктор физико-математических наук, профессор

  
А.А. Федянин

«14» января 2019 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова) о диссертации Копьева Алексея Викторовича «Исследование статистических свойств тензора градиентов скорости в изотропном несжимаемом турбулентном потоке», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Диссертационная работа А.В. Копьева посвящена актуальным вопросам теории развитой гидродинамической турбулентности несжимаемой ньютоновской жидкости. Предметом исследования является тензор градиентов скорости, а также его симметричная и антисимметричная компоненты, выражаемые тензором скоростей деформации и вектором завихренности соответственно. Исследуются их различные статистические характеристики, такие как функции распределения и корреляторы, при изучении которых используются аналитические методы и статистический анализ численных симуляций изотропного турбулентного потока. Изучается как одномоментная и одноточечная статистика, так и многомоментная и многоточечная. В диссертации приведены новые аналитические и аппроксимационные соотношения для различных статистических характеристик тензора градиентов скорости и его компонент.

**Актуальность темы** обусловлена как прикладными задачами, связанными с необходимостью моделирования мелкомасштабной турбулентности в расчетах, так и фундаментальным интересом к проблеме турбулентности, не имеющей пока удовлетворительного решения. Мощности современных суперкомпьютеров пока что не позволяют напрямую рассчитывать турбулентные течения, возникающие в прикладных задачах, таких как обтекание планера самолета или горение газа в диффузоре и многие другие. Таким образом, точные аналитические и универсальные аппроксимационные соотношения для мелкомасштабной турбулентности крайне полезны для валидации и формулировки моделей, применяемых при расчете таких течений. С другой стороны, на сегодняшний день в принципе не существует общего подхода к описанию турбулентного движения

жидкости, поэтому получение таких соотношений крайне интересно с фундаментальной точки зрения.

**Научная новизна и теоретическая и практическая значимость.** Все выносимые на защиту результаты, достаточно полно изложенные в тексте диссертации, являются новыми и оригинальными.

Так, путем удачного выбора переменных впервые была замечена симметрия функции распределения тензора скоростей деформации. Автор называет обнаруженную симметрию вырождением и аналитически показывает ее наличие для гауссового распределения. Убедительно продемонстрирован универсальный характер этой симметрии, что позволяет надеяться на возможность решения задачи об ее аналитическом выводе из уравнений динамики. Также новыми являются аналитические и аппроксимационные соотношения для смешанных корреляторов скорости и градиентов скорости. Для их проверки использован оригинальный метод дополнительной изотропизации численных данных, позволяющий улучшить точность соблюдения закона четырех пятых, а также новых соотношений, выведенных автором и названных им законами восьми пятнадцатых, которые требуют локальной изотропии потока. Поскольку в диссертации показано, что динамики парных корреляторов недостаточно для вывода этих соотношений, то возникает похожая задача об аналитическом выводе этих соотношений из уравнений на старшие корреляторы. Обе задачи представляют значительный интерес, а наличие известных простых ответов для этих задач, полученных в диссертации путем статистического анализа численных данных, дают серьезные основания считать, что их аналитическое решение будет также предложено в скором времени.

Кроме того, впервые были получены количественные аналитические соотношения для измеренного ранее пируэт-эффекта. На основании анализа нескольких численных и теоретических исследований предложена модель, позволяющая свести задачу о динамике искомого коррелятора к линейной стохастической задаче. Несмотря на специфичность исследуемых величин, называемых в диссертации крупномасштабными, для которых справедлива применяемая модель, сам факт наличия линейных механизмов в турбулентности представляется весьма интересным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, поскольку линейные эффекты значительно проще поддаются анализу и моделированию.

**Достоверность полученных теоретических результатов** обеспечивается их сравнением с экспериментальными и численными данными. Аппроксимационные соотношения получены путем статистического анализа современных численных решений основополагающих уравнений Навье-Стокса. Их универсальность обеспечивается надежно проверенной гипотезой об универсальности изотропной турбулентности. Аналитические результаты получены путем теоретического анализа этих уравнений. Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 печатных изданиях, 3 из которых опубликованы в

журналах, рекомендованных ВАК, и апробированы в докладах на одной международной и пяти всероссийских конференциях.

**Общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 106 страниц, включая 21 рисунок и 1 таблицу. Список литературы содержит 110 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приводится обзор научной литературы по теме диссертационной работы, формулируются цели работы. Показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассматриваются особенности статистики тензора скоростей деформации в изотропной турбулентности. Численно выявлена незамеченная ранее симметрия статистики тензора, с учетом которой функция распределения его компонент сведена к функции одной переменной. Найдена двухпараметрическая логнормальная аппроксимация статистики тензора и определена зависимость параметров аппроксимации от числа Рейнольдса. Физическая интерпретация результатов произведена путем сравнения численно обнаруженных результатов с аналитическими расчетами статистики тензора в случае гауссового поля скорости.

Во второй главе сформулирована и проанализирована теоретическая модель, в которой задача о динамике жидкой частицы в инерционном интервале масштабов сведена к линейной стохастической задаче. В рамках гауссовой модели аналитически посчитана зависимость от времени корреляторов, измеренных и численно рассчитанных ранее. Соответствующие оценки показывают удовлетворительное согласие теории и эксперимента.

В третьей главе аналитически найдены четырехиндексные двухточечные смешанные корреляторы скорости и градиентов скорости. Результаты проверены путем сравнения аналитических формул с результатами прямого численного моделирования изотропной турбулентности. Численно проиллюстрирована универсальность этих законов, а также определена новая универсальная скалярная функция, входящая в выражения для некоторых смешанных корреляторов. Произведен трудоемкий анализ пятииндексных двухточечных смешанных корреляторов, которые выражены через четыре новые скалярные функции, также рассчитанные численно. Указана применимость полученных результатов в конкретных астрофизических приложениях.

В заключении приведены основные результаты работы.

К сожалению, диссертация не свободна от некоторых недостатков. Так, в главе 1, на рисунке 1.12 не подписаны оси. В главе 2 рисунки отсутствуют, что затрудняет понимание материала. Стоило, например, показать и проиллюстрировать, для каких жидких частиц предположения разработанной автором модели верны точно, а не только приводить ссылки известных работ, на результаты которых эти предположения опираются. Также рисунок требуется в конце главы для наглядного сравнения результатов экспериментов и модели.

Далее, в главе 3 численная проверка аналитически полученных результатов произведена в интервале до 90 диссипативных масштабов (рисунки 3.1 и 3.2), однако исследуемые автором численные данные, по информации, приведенной в

разделе 1.4.1 на странице 28, позволяют произвести сравнение вплоть до 500 диссипативных масштабов. Было бы интересно сопоставить результаты теории и численных расчетов на больших масштабах, где условие статистической изотропии начинает нарушаться. Также более иллюстративно было бы представить эти результаты в логарифмическом масштабе по расстоянию, а не в арифметическом.

Кроме того, предложенный в разделе 3.2 метод изотропизации статистических данных, основанный на предыдущих численных результатах, позволяет проверить полученные соотношения не только в течениях с периодическими граничными условиями (что сделано в диссертации), а например, и в развитом турбулентном течении в трубе, численные расчеты которого также имеются в открытом доступе на том же сайте, что и использованные автором расчеты. Такая проверка этих соотношений, не проделанная в диссертации, являлась бы интересным дополнением к проведенному исследованию.

Изложенные выше замечания не снижают научной ценности полученных в диссертации результатов. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой на актуальную тему. Выводы и положения диссертации соответствуют представленным результатам. Автореферат диссертации достаточно полно отображает содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ.

Диссертационное исследование Копьева Алексея Викторовича на тему «Исследование статистических свойств тензора градиентов скорости в изотропном несжимаемом турбулентном потоке» соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Отзыв составлен заведующим лабораторией общей аэродинамики Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова доктором физико-математических наук Никитиным Николаем Васильевичем. Отзыв обсужден и утвержден на семинаре «Неустойчивость и турбулентность» в НИИ механики МГУ 10 января 2019г. Протокол №36.

Заместитель директора НИИ механики МГУ,  
доктор физико-математических наук

Николай Андреевич Остапенко

Заведующий лабораторией общей аэродинамики  
НИИ механики МГУ,  
доктор физико-математических наук

Николай Васильевич Никитин

### **Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова)

Адрес: 119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1

Телефон: (495) 939-31-21

E-mail: nvnikitin@mail.ru

Список некоторых публикаций сотрудников Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета им. М.В. в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет:

1. Demekhin E.A., Nikitin N.V., and Shelistov V.S. "Three-dimensional coherent structures of electrokinetic instability" *Phys. Rev. E* 90, 013031 (2014)
2. Баранов П.А., Гувернюк С.В., Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е. «Применение различных моделей турбулентности для расчета несжимаемых внутренних течений» *Ученые записки ЦАГИ* 45 (2), 63-77 (2014)
3. Никитин Н.В., Пиманов В.О. «Численное исследование локализованных структур в трубах» *Изв. РАН. МЖГ* 5, 64-75 (2015)
4. Никитин Н.В., Пиманов В.О. «Локализованные турбулентные структуры в круглой трубе» *Ученые записки Казанского университета. Серия Физ.-мат. науки* 157: 3, 111–116 (2015)
5. Окунев Ю.М., Привалова О.Г., Самсонов В.А. «Моделирование спуска тяжелого оперенного тела в атмосфере» *Математические методы в технике и технологиях* 1 (71), 76-79 (2015)
6. Гувернюк С.В., Зубин М.А. «О структуре пристеночных течений при турбулентном обтекании полусферических лунок» *Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках (тезисы докладов)* 120-121 (2015)

7. Лебедева Н.А., Осипцов А.Н. «Комбинированный лагранжев метод для моделирования осесимметричных вихревых газодисперсных течений» Изв. РАН. МЖГ 5, 72-85 (2016)
8. Баранов П.А., Гувернюк С.В., Зубин М.А., Исаев С.А., Усачов А.Е. «Применение различных моделей турбулентности для расчета несжимаемых внутренних течений» Ученые записки ЦАГИ 48 (1), 26-36 (2017)
9. Никитин Н.В., Пиманов В.О. «О поддержании колебаний в локализованных турбулентных структурах в трубах» Изв. РАН. МЖГ 1, 68-76 (2018)
10. Krasnopolsky B.I. “Generation of multiple turbulent flow states for the simulations with ensemble averaging” Supercomputing Frontiers and Innovations 5: 2, 55-62 (2018)
11. Krasnopolsky B.I. “Optimal strategy for modelling turbulent flows with ensemble averaging on high performance computing systems” Lobachevskii J Math 39: 533 (2018)
12. Krasnopolsky B.I. “An approach for accelerating incompressible turbulent flow simulations based on simultaneous modelling of multiple ensembles” Computer Physics Communications 229, 8-19 (2018)
13. Papoutsakis A., Rybdylova O.D., Zaripov T.S., Danaila L., Osiptsov A.N., Sazhin S.S. «Modelling of the evolution of a droplet cloud in a turbulent flow» International Journal of Multiphase Flow 104, 233-257 (2018)