

ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Задача построения последовательной теории турбулентности известна как одна из главных нерешенных проблем классической физики. Простейшим для теоретического анализа примером турбулентности является так называемая однородная и изотропная турбулентность, концепт которой был впервые предложен Дж. Тейлором в 1935 году. Основополагающие результаты в соответствующей теории были получены А.Н. Колмогоровым и А.М. Обуховым в 1941 году, которыми было также введено понятие локально изотропной турбулентности, достигающейся с хорошей точностью в развитых турбулентных потоках на мелких масштабах и вдали от границ – в так называемом инерционном интервале. Одним из главных результатов теории Колмогорова-Обухова, выведенным без привлечения феноменологических соображений, является закон «четырех пятых» о продольной структурной функции скорости третьего порядка, которая оказывается пропорциональной произведению расстояния на среднее значение диссипации энергии в единице массы потока. При этом, как показали эксперименты и численные расчеты, феноменологические аспекты теории требуют определенных уточнений. Эти уточнения в первую очередь связаны с явлением перемежаемости, которое проявляется в сильной неоднородности диссипации энергии в потоке. Несмотря на значительные успехи в понимании природы перемежаемости (в первую очередь связанные с развитием вычислительных экспериментов), до сих пор отсутствует общепринятая количественная теория, которая объясняла бы это явление. Диссипация энергии выражается через тензор градиентов скорости. Поэтому исследование статистических свойств этого тензора, а также их влияния на корреляционные свойства развитой турбулентности, представляет собой важную и актуальную задачу современной теории турбулентности.

Диссертация А.В. Копьева посвящена изучению статистических свойств тензора градиентов скорости для развитой изотропной гидродинамической турбулентности. В работе решены несколько важных задач, связанных с этим направлением, при этом применялись как аналитические методы, так и анализ численного моделирования изотропной турбулентности. Актуальность диссертации не вызывает сомнений.

Текст диссертации состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении обоснованы актуальность, теоретическая и практическая значимость работы, приведен краткий обзор литературы и сформулировано место диссертационной работы в ряде других современных исследований.

В первой главе численно обнаружены и проанализированы новые свойства тензора скоростей деформации, представляющего собой симметричную часть тензора градиентов скорости. След квадрата этого тензора определяет скорость диссипации энергии в потоке. В работе выявлено вырождение распределения тензора скоростей деформации, а именно показано, что это распределение может быть сведено к функции одной переменной. Установлена связь этого вырождения с универсальностью других широко используемых

функций распределения, произведено сравнение обнаруженных свойств с гауссовым случаем и предложена логнормальная аппроксимация статистики тензора, параметрически зависящая от числа Рейнольдса.

Во второй главе рассмотрен механизм начальной стадии образования высокоинтенсивных вихревых структур, с наличием которых в первую очередь связано отклонение колмогоровской теории от экспериментов и численных расчетов. Предложена и обоснована линейная модель, в которой на масштабах из инерционного интервала тензор скоростей деформации не испытывает воздействия завихренности, то есть является независимым случайным процессом. Эта модель позволила впервые получить количественные аналитические оценки для эффекта раскручивания жидких частиц из инерционного интервала (пируэт-эффекта), согласующиеся с результатами экспериментов и численного моделирования. Фактически продемонстрировано, что на начальной стадии образования интенсивных вихревых структур линейные эффекты, по-видимому, играют определяющую роль.

В третьей главе изучены трети смешанные корреляторы скорости и градиентов скорости и получены новые точные выражения для некоторых из этих корреляторов. Полученные выражения является значительным достижением, поскольку вместе с законом «четырёх пятых» Колмогорова представляют собой одни из немногих точных соотношений в теории изотропной турбулентности, выведенных без привлечения феноменологических соображений. Полученные соотношения успешно проверены с помощью статистического анализа современных численных расчетов изотропной турбулентности. Корреляторы, найденные точно, выражены через новую скалярную функцию, для которой численно показано, что она является универсальной константой. Установлено, что этот результат не может быть получен рассмотрением динамики парных корреляторов, а требует рассмотрения полной цепочки уравнений Фридмана-Келлера. Стоит отметить, что полученные новые соотношения представляют значительный интерес в теории турбулентного транспорта.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Исследование, изложенное в диссертации А.В. Копьева, является актуальным, обеспечивая существенный прогресс в теории развитой гидродинамической турбулентности. Все полученные А.В. Копьевым результаты являются новыми, оригинальными и достоверными. Они были доложены на научных семинарах, сессиях, одной международной и нескольких всероссийских конференциях и представлены в трех рецензируемых журнальных публикациях. Стоит отметить, что две из трех опубликованных научных статей представлены в ведущих международных журналах - Physical Review Fluids и Journal of Turbulence, и при этом в первой из них диссертант является единственным автором. Полученные А.В. Копьевым результаты имеют существенную теоретическую значимость и могут быть применены для астрофизических приложений и для построения моделей мелкомасштабной турбулентности в вычислительной гидродинамике. Затрагиваемые автором вопросы исследованы им с большой степенью полноты и все рассуждения доведены до содержательного положительного результата. Автором изучено большое количество литературы, посвященной современному состоянию исследований, а также освоена и успешно применена необходимая математическая техника. В работе успешно совмещен аналитический подход и статистический анализ численных данных.

По диссертации можно высказать два следующих замечания.

- 1) В первой главе подробно исследуется изменение параметра вырождения для малоинтенсивных пульсаций, однако не затронут вопрос о поведении функции распределения для очень сильных пульсаций. Было бы интересно исследовать границы применимости обнаруженного вырождения статистики в зависимости от числа Рейнольдса.
- 2) В третьей главе высказано предположение, что универсальное значение для функции $d(b)$ может быть определено однозначно из цепочки динамических уравнений на моменты. Было бы интересно исследовать, можно ли аналитически получить это значение, используя разработанную в литературе диаграммную технику для цепочки уравнений Фридмана-Келлера.

Изложенные замечания не снижают научной значимости представленных в диссертации результатов, и по сути их нужно рассматривать как рекомендации для дальнейшей работы.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и является законченным научным исследованием. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертация А.В. Копьева «Исследование статистических свойств тензора градиентов скорости в изотропном несжимаемом турбулентном потоке» полностью удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

Официальный оппонент

Агафонцев Дмитрий Сергеевич

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

Лаборатории нелинейных волновых процессов

Отдела крупномасштабных процессов и климата

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»,

117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д.36,

e-mail: dmitry.agafontsev@gmail.com

Подпись Агафонцева Дмитрия Сергеевича заверяю

Ученый секретарь

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук»,

кандидат географических наук

Фалина Анастасия Сергеевна



19.01.2019