

ОТЗЫВ

официального оппонента
Троицкой Юлии Игоревны

на диссертацию Зарипова Динара Ильясовича

«Развитие высокопроизводительных панорамных методов диагностики и их приложение к исследованию интенсивных событий в турбулентном пограничном слое»,

представленную на соискание

ученой степени доктора физико-математических наук

по специальности 1.1.9. – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Зарипова Д.И. развивает новое, **актуальное** и практически важное научное направление, связанное с разработкой панорамных методов диагностики, прежде всего, метода анемометрии по изображениям частиц (particle image velocimetry, PIV) и метода дымовой визуализации (smoke image velocimetry, SIV), позволяющих производить прецизионные измерения, необходимые для детального исследования когерентных структур в турбулентном пограничном слое. В фокусе работы – структуры с экстремальными параметрами, которые могут оказывать интенсивное воздействие на работу приборов и механизмов, приводя в некоторых случаях к выходу из расчетных режимов. Знание о детальных характеристиках интенсивных когерентных структур в пограничных слоях океана и атмосферы необходимо для корректных параметризаций процессов турбулентного переноса в верхнем слое океана, а также выноса аэрозольных частиц в атмосферу с подстилающей поверхности.

Ключевая научная проблема, рассматриваемая в диссертации Д.И. Зарипова, связана с изучением интенсивных событий, сопровождающихся резким локальным возрастанием скорости диссипации энергии турбулентности, которые

являются проявлением фундаментального свойства турбулентности, перемежаемости. Экспериментальное исследование пространственной структуры таких событий диктовало необходимость использования панорамных методов диагностики потоков и потребовало беспрецедентных точности и пространственного разрешения. В результате были разработаны новые методы и алгоритмы восстановления полей скорости потоков, значительно превосходящие мировые аналоги по производительности и позволяющие детально исследовать структуру турбулентности на масштабах меньше колмогоровского, например, явление обратного пристеночного течения. С учетом этого можно констатировать, что диссертация Д.И. Зарипова имеет большую **научную и практическую значимость**. Следует подчеркнуть, что результаты работы могут быть в дальнейшем использованы при разработке следующих поколений панорамных методов, позволяющих измерять мгновенные поля скорости вблизи подвижных границ в режиме реального времени, например, в атмосферном пограничном слое над взволнованной водной поверхностью.

Диссертация состоит из Введения, 4-х глав, Заключения, списка использованных источников и списка публикаций автора, в которых опубликованы основные результаты работы.

Во **Введении** обсуждается актуальность работы, степень разработанности проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, достоверность полученных результатов, научная и практическая значимость работы. Также сформулированы положения, выносимые на защиту, и представлено краткое содержание работы.

В **первой главе** автор детально описывает проблемы, возникающие при использовании современных панорамных методов при исследовании интенсивных турбулентных флуктуаций в пограничном слое, и предлагает их решение на основе разработки новых усовершенствованных алгоритмов PIV. Здесь хотелось бы отметить оригинальный подход к определению полей скорости, основанный

на использовании двух проекций изображения частиц вместо двумерного изображения, который позволил существенно (в некоторых случаях почти на порядок) ускорить вычисление мгновенных векторных полей скорости. Кроме того, весьма впечатляет предложенный автором бессеточный метод PIV-GF, основанный на использовании метода наименьших квадратов, который ранее показал свою эффективность при решении уравнения Пуассона на нерегулярной сетке.

Вторая глава посвящена определению точности измерения полей скорости потоков на основе предложенных алгоритмов PIV и SIV и алгоритмов ускорения вычислений. Для оценки погрешностей используется численное моделирование изображений частиц с заданными параметрами (размер, форма, концентрация, фоновый шум, градиент смещений и т.д.). Проведенное исследование позволило убедительно доказать высокую точность и достоверность разработанных методов измерения скоростей потоков методами PIV и SIV, а также определить оптимальные значения параметров, при которых проводятся измерения. *Правда, выбор оптимальных значения не всегда достаточно разъяснен в тексте диссертации. Так, на стр. 103 указан "оптимальный диаметр изображения частицы, обеспечивающий наилучшее разрешение и наименьшую погрешность измерения", который оценен примерно в 3 пикс. Однако не представлено объяснение, как получена оценка 3 пикс и почему это оптимальное значение.*

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований на основе панорамных методов продукции и диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций. Подробно обсуждаются проблемы, возникающие при измерении скорости диссипации турбулентной энергии, которые вызваны необходимостью вычислять пространственные производные для компонент мгновенного векторного поля скорости. Для корректного решения этой задачи требуется получение полей скорости высокого разрешения и тщательной оценки погрешности измерений, которая не должна превосходить истинные значения

пульсации скорости. Здесь мне хотелось бы отметить простую и физически прозрачную процедуру спектральной фильтрации случайных ошибок измерения, которая очень хорошо проиллюстрирована схематичным рисунком 3.2.1 и реальными спектрами флуктуаций на рис. 3.3.7. Применение разработанных автором алгоритмов PIV и процедуры фильтрации позволило достигнуть высокого пространственно-временного разрешения при измерении полей скорости, в том числе, в вязком подслое. Это дало возможность не только достоверно воспроизвести профиль средней скорости диссипации кинетической энергии турбулентности с резким максимумом на стенке, но и изучить флуктуации диссипации и продукции кинетической энергии турбулентности. При этом особенный интерес вызывает экспериментальное исследование наиболее интенсивных турбулентных флуктуаций, сопровождающихся высокими мгновенными локальными значениями скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности в турбулентном пограничном слое. На основе выполненного впервые совместного анализа флуктуаций полей скорости, а также производных от него полей скорости диссипации и продукции кинетической энергии турбулентности автор диссертации показал, что наиболее интенсивные события генерации и диссипации не являются независимыми, а представляют собой проявления когерентных вихревых структур. Замечания к 3-й главе носят либо редакционный характер, либо характер пожеланий. 1) На стр. 159 допущена опечатка (?) в описании слагаемых уравнения (3.1.1), ответственных за диссипацию и генерацию энергии турбулентности. 2) Интеграл от спектральной плотности мощности белого шума в бесконечных пределах, входящий в уравнение (3.2.2), расходится. Было бы правильно указать конечные пределы интегрирования в диапазоне задействованных частот. 3) В таблице 3.3.1 указаны некорректные единицы измерения кинематической вязкости воздуха, должны быть $\text{см}^2 \text{с}^{-1}$. 4) На стр. 204 утверждается, что при скоростной видеосъемке за время экспозиции частицы в буферной зоне (при $y^+ = 12$) смещались примерно на 5 пикс. В этом

случае изображение должно иметь вид штриха. На мой взгляд, эта особенность использованных изображений, ее влияние на кросскорреляционную функцию и точность определения смещений частиц заслуживала бы более подробного обсуждения. 5) При обсуждении рис.3.4.5. упомянуты два выраженных "хвоста" двумерной плотности вероятности распределения флуктуаций продольной скорости потока и скорости диссипации энергии турбулентности. В то же время, можно заметить, что таких "хвостов" три, поскольку плотность вероятности, относящаяся к высокоскоростным флуктуациям расщеплена. Это, по-видимому, указывает на то, что существует по крайней мере две моды "свигов". На мой взгляд, этот факт заслуживал бы упоминания и обсуждения.

Четвертая глава посвящена исследованию явления обратного пристеночного течения на основе физического эксперимента с применением прецизионной техники PIV и прямого численного моделирования. Применение новых эффективных алгоритмов PIV позволило автору обнаружить это явление в безградиентном пограничном слое при сравнительно малых числах Рейнольдса ($207 < Re_\tau < 672$), а также обнаружить его в углах канала квадратного поперечного сечения. Важнейшим новым результатом является идентификация различных механизмов формирования обратного пристеночного течения, что позволило объяснить различную частоту появления этого явления в центральной части канала и вблизи его стенок.

Обобщая содержание отзыва можно утверждать, что диссертационная работа Зарипова Д.И. представляет законченное, серьезное и многостороннее научное исследование, выполненное на высоком профессиональном уровне и соответствующее мировым стандартам в области механики турбулентных течений и прецизионных методов измерения характеристик течений жидкости и газа. Основные цели диссертационной работы достигнуты. Все полученные результаты являются **новыми**. Достоверность исследования подтверждается большим экс-

периментальным материалом. Актуальность работы и **личный вклад автора** четко сформулированы и не вызывают сомнения. Автор известен по своим публикациям и выступлениям на конференциях различного уровня. Совокупность выполненных автором исследований и полученных результатов составляет крупное научное достижение, сутью которого является разработка новых высокопроизводительных панорамных методов диагностики турбулентных течений, а также их применение для решение проблемы измерения скорости диссипации турбулентности и экспериментального исследования экстремальных турбулентных флуктуаций в турбулентном пограничном слое и канале квадратного сечения, в том числе, сопровождающиеся явлением обратного пристеночного течения.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждении ученых степеней.

Диссертация Зарипова Д.И. соответствует всем критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней:

- совокупность выполненных автором исследований и полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение;
- диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, выдвигаемые для публичной защиты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку;
- основные научные результаты опубликованы в 28 научных работах, в т. ч. в 15 статьях в рецензируемых русскоязычных научных журналах, входящих в список ВАК;
- в диссертации соискатель ученой степени надлежащим образом ссылается на цитируемые источники, заимствованные материалы и их авторов.

Заключение.

Диссертация Зарипова Динара Ильясовича представляет собой законченное научное исследование, в котором на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор, Зарипов Динар Ильясович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук

(01.04.03 – Радиопизика),

старший научный сотрудник,

Заведующая Отделом нелинейных геофизических процессов

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр»

Институт прикладной физики

Российской академии наук»

01 марта 2022 г.

[Handwritten signature]

Троицкая Юлия Игоревна

Подпись Ю.И.Троицкой заверяю.

Ученый секретарь ИИФ РАН

к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валерьевич

Адрес: 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН). Телефон: 8 314 36 82 97 (раб.). E-mail: yuliya@hydro.appl.sci-nnov.ru.