

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Диссертация Д.И.Зарипова посвящена развитию высокопроизводительных панорамных методов диагностики турбулентных течений и их применению для изучения интенсивных гидродинамических событий, происходящих в пристеночном слое. Несомненная актуальность выполненного Д.И.Зариповым исследования обусловлена как фундаментальным значением все более глубокого понимания локальной динамики пристеночного турбулентного движения с присущими ему когерентными вихревыми структурами, так и возникающими вызовами по совершенствованию методик высокоскоростной панорамной диагностики актуальных полей скорости, в том числе с обеспечением достоверных измерений на колмогоровском масштабе.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы, а и также списка условных обозначений и сокращений. Материал диссертации изложен на 324 страницах, включающих 123 рисунка и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает 410 наименований.

Основные результаты, полученные соискателем по теме диссертации, заключаются в следующем.

1. Разработан новый итерационный (многопроходный) кросскорреляционный метод обработки PIV-изображений частиц, именуемый «бессеточным» (Grid-free, GF). В этом, показавшем свою высокую эффективность методе процедура итерационной деформации изображений использует значения первой и второй производных поля смещения частиц, которые вычисляются по методу наименьших квадратов по значениям смещений в нерегулярно расположенных, свободно выбираемых точках, окружающих текущий узел расчетной сетки. При этом автор удачно использует идеи и алгоритмы, разработанные ранее специалистами в области вычислительной гидродинамики для расчета пространственных производных в численном методе конечных объемов, оперирующем нерегулярными (неструктурированными) сетками. В диссертации показано, что указанная «свобода» метода PIV-GF, а также возможность добавления «виртуальных» точек с заранее известными значениями скорости

(прежде всего, на стенке) позволяет существенно повысить пространственное разрешение, уменьшить неопределенности в результатах измерения скорости, особенно в непосредственной близости к стенке, а также расширить диапазон измеряемых градиентов скорости.

2. Разработан ряд оригинальных алгоритмов для ускорения расчетов мгновенных векторных полей скорости, измеряемых планарными методами PIV (Particle Image Velocimetry) и SIV (Smoke Image Velocimetry). Показана и количественно оценена продуктивность использования лежащей в основе данных алгоритмов идеи, согласно которой вместо исходного двумерного изображения обрабатываются его проекции на две взаимно ортогональные линии.

3. Проведено обстоятельное исследование неопределенностей результатов измерений по методу SIV и показано, что данный метод обладает выраженными преимуществами перед стандартным методом PIV в условиях, когда измеряются большие перемещения относительно крупных изображений частиц при их высокой концентрации.

4. Получены важные методологические результаты и заключения по проблеме измерения методом PIV такой величины как скорость диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ). Выполнен убедительный анализ совместного влияния случайной погрешности измерения и параметров пространственного разрешения на достоверность результатов измерений скорости диссипации КЭТ по планарному методу PIV. Сформулированы рекомендации по выбору оптимальных параметров измерения, с акцентом на диагностику пристенной части турбулентного течения. Разработан критерий для выбора пороговой частоты отсечки верхних частот в спектре временного ряда измеренной локальной составляющей скорости. Основанный на выбранном критерии метод фильтрации временного ряда («фильтрации осциллограмм скорости» в терминологии автора) позволяет исключить область частот, в которой случайные неопределенности результатов измерения преобладают над истинным значением пульсации скорости; в итоге разработанная автором процедура существенно снижает влияние случайных неопределенностей на оценку скорости диссипации КЭТ уже на первых итерациях многопроходного метода PIV.

5. Предложен механизм, объясняющий возникновение в пристеночной части течения кратковременных и, вместе с тем, наиболее интенсивных событий, характеризующихся всплеском локальных мгновенных значений скорости диссипации и генерации КЭТ. По результатам обстоятельных измерений планарным методом PIV установлено, что наиболее высокие значения скорости диссипации КЭТ возникают в вязком подслое как следствие интенсивного вращательного движения квазипродольных вихревых структур, которые, вместе с тем, вызывают и наиболее высокие значения генерации КЭТ, но уже в буферном слое пристеночного течения.

6. Впервые экспериментально подтверждено существование локальных зон с обратным пристеночным течением (ОПТ) в слабоградиентном турбулентном потоке при относительно небольших значениях динамического числа Рейнольдса Re_τ (в интервале 200 ... 670). Предложен механизм, объясняющий формирование ОПТ в результате взаимодействия крупномасштабных областей ускоренного и заторможенного течения, ведущего к формированию интенсивно завихренного сдвигового слоя на границе их раздела. В работе показано, что формирующийся сдвиговой слой эволюционирует сначала в квази-поперечные, а затем в подковообразные пристеночные вихревые структуры, из которых наиболее близкие к стенке индуцируют возникновение локального обратного течения.

7. Впервые, посредством прямого численного моделирования развитого турбулентного течения в канале квадратного сечения и целенаправленного анализа расчетных данных, обнаружены зоны ОПТ в углах канала. Показано, что в данном случае механизм возникновения ОПТ обусловлен действием вихревых структур, расположенных в окрестности угла и вытянутых в продольном направлении. На основе заключения о различии в механизмах формирования ОПТ в углах и в центральной части канала дано объяснение впервые обнаруженной немонотонности в распределении вероятности возникновения ОПТ вдоль поперечной координаты, с общим увеличением вероятности на три порядка при смещении от центральной линии к углу канала. Показано также, что события ОПТ, наблюдаемые в углах канала, характеризуются существенно большим временем жизни по сравнению с явлением ОПТ, регистрируемым в центральной области.

Степень достоверности полученных в диссертации результатов представляется высокой по следующим обстоятельствам. При проведении измерений использовались достаточно апробированные высокопроизводительные панорамные методы диагностики турбулентных течений и верифицированные алгоритмы обработки данных. Применимость этих методов в условиях рассматриваемых задач детально проанализирована в диссертации, а правильность выбора основных параметров, влияющих на точность измерений, специально обоснована, включая выполненные автором систематические оценки неопределенностей, присущих измерениям полей скорости планарными методами PIV и SIV, с привлечением «синтетических» и экспериментальных данных. В работе использованы вычислительная методика и программное средство для прямого численного моделирования турбулентного течения, которые также достаточно апробированы. Применимость вычислительной методики для условий, при которых изучаются гидродинамические турбулентные процессы с интенсивными локальными событиями, в диссертации обоснована. Полученные автором численные и экспериментальные результаты согласуются друг с другом, а также с результатами представленных в литературе исследований, критически проанализированных автором.

Полученные соискателем результаты имеют выраженную научную и практическую значимость. Фундаментальное значение имеют разделы, ведущие к более глубокому пониманию локальной динамики пристеночного турбулентного движения с присущими ему когерентными вихревыми структурами и интенсивными локальными событиями, наблюдаемыми на уровне колмогоровского масштаба. Полученные новые знания о событиях, характеризующих всплеском локальных мгновенных значений скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности, способствуют развитию общей теории пристеночной турбулентности и могут быть полезны при разработке новых подходов к численному моделированию турбулентного движения жидкости при высоких значениях числа Рейнольдса. Представленные механизмы, объясняющие возникновение локальных зон обратного пристеночного течения в слабоградиентном турбулентном потоке, могут быть использованы при разработке пассивных и активных методов управления сопротивлением трения и теплопередачей. Авторские достижения по совершенствованию методик высокоскоростной панорамной диагностики актуальных полей скорости находятся на самом передовом уровне и во многом превосходят по производительности мировые аналоги, открывая тем самым новые возможности в экспериментальном изучении «тонких» явлений и эффектов пристеночной турбулентности, проявляющихся на уровне колмогоровского масштаба.

Диссертация хорошо структурирована, с научным стилем изложения материала. Содержание работы отражает не только весьма и весьма значительный объем, но и достаточную глубину проведенного исследования. Разделы диссертации логически связаны между собой и в совокупности представляют цельное завершенное научное исследование.

При прочтении диссертационной работы возник ряд вопросов и замечаний:

1. На стр. 196 диссертации автор, ссылаясь на рис.3.3.13, формулирует заключение о том, что разработанная им методика «позволяет достоверно оценить скорость диссипации КЭТ во всем рассматриваемом диапазоне y^+ , включая пристеночную область ТПС, даже при использовании гипотезы о локальной осесимметричной турбулентности (3.1.8)». Здесь, однако, неясно, что автор вкладывает в слово «даже»? С другой стороны, в работе Tardu 2017 года, упоминаемой неоднократно в диссертации под номером [54], показано, что применение формулы (3.1.8), следующей из гипотезы о локальной осесимметричности турбулентности, приводит для $y^+ < 10...15$ к существенному завышению значений скорости диссипации, при измерениях планарным методом PIV; последнее явно отражается и в результатах измерений автора на рис. 3.3.13. Представляется, вместе с тем, достаточно очевидным, что введение поправки,

легко определяемой по данным из работы Tardu (линия b на Фиг.3 в [54]), могло бы нивелировать наблюдаемое завышение измеренных значений.

2. При исследовании интенсивных всплесков скорости диссипации в вязком подслое расчет этой величины по данным планарного метода PIV обоснованно проводится автором с использованием формулы (3.4.1), пригодной для использования собственно в вязком подслое, при $y^+ < 5$. Неясно, однако, зачем при обработке результатов собственных измерений автор на рис. 3.4.4 «протягивает» заведомо неадекватное применение данной формулы вплоть до $y^+ \approx 20$; при этом наблюдаемое расхождение с «эталонными» данными DNS «поясняется» мало что говорящей фразой: «Недооценка скорости диссипации КЭТ при $y^+ > 5$ согласуется с результатами работы [54]».

3. При описании экспериментальной установки с длинным каналом квадратного сечения сообщается, в частности (стр.204), что «Стабильный расход воздуха в канале обеспечивался комплектом поверенных критических сопел, установленным между компрессором и рабочим участком канала». Однако, из схемы установки, приведенной на рис.3.3.3, можно заключить, что воздух, подаваемый из атмосферы, отсасывался через выходное сечение рабочего участка. Соответственно, использование слова «компрессор» приводит в некоторое замешательство. Видимо, речь идет о вакуумном насосе? Или о компрессоре, работающем в режиме вакуумного насоса?

4. На стр. 244 автор пишет «Как видно из рис. 4.2.13, это (влияние случайной погрешности) на порядок завышает значение вероятности ОПТ на расстоянии $y^+ \approx 0,3$, где влияние случайной погрешности измерения наибольшее. ... применение процедуры фильтрации позволяет значительно повысить надежность определения вероятности ОПТ в этой области. В результате, количество независимых событий ОПТ уменьшилось с 1163 до 8». Изложенное вызывает ряд вопросов. Во-первых, указанное уменьшение числа событий ОПТ в результате фильтрации составляет два с лишним порядка. Во-вторых, столь кардинальное уменьшение числа событий ОПТ является следствием приложения процедуры, в которой исходно заложены некие условности и неопределенности, и неясно, может ли их «варьирование» влиять на отсеивание «ложных» событий? Далее автор пишет «Детальный анализ осциллограмм скорости на различных расстояниях от стенки канала показал, что все 8 обнаруженных событий действительно относились к явлению ОПТ..., в то время как остальные события оказались ложными». Однако составляющие указанного анализа на случаях ложных событий не иллюстрируются, что было бы желательно, особенно в свете столь сильного влияния применения процедуры фильтрации.

Высказанные замечания относятся к представлению материала на страницах диссертации и не снижают общую высокую оценку диссертационной работы соискателя. Представленная Д.И.Зарипова диссертация является цельной научно-

исследовательской работой, вносящий крупный вклад в современную экспериментальную гидродинамику и в фундаментальные знания о динамике пристеночного турбулентного движения.

Тема диссертации и характер выполненных исследований соответствует специальности 1.1.9 — механика жидкости, газа и плазмы.

Основные результаты диссертации опубликованы в 28 трудах, 17 из которых – в научных журналах из Перечня ВАК, 14 – в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science. Содержание автореферата соответствует основным положениям и выводам из представленной диссертационной работы.

Считаю, что диссертация Зарипова Динара Ильясовича является завершенной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с пунктами 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013. Автор диссертации 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
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор,
профессор Высшей Школы прикладной математики и вычислительной физики
ФГАОУ ВО «СПбПУ», главный научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории гидроаэродинамики Физико-механического института СПбПУ,

Смирнов Евгений Михайлович
25.02.2022

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
192251, С.-Петербург, Политехническая улица, д.29,
тел./факс (812) 552-66-21, email: aero@phmf.spbstu.ru

