

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Института механики сплошных
сред Уральского отделения Российской
академии наук – филиала Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Пермского федерального
исследовательского центра Уральского
отделения Российской академии наук,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН

22.02.2022

В.П. Матвеенко

ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Актуальность темы исследования определяется тем, что для развития принципиально новых аэродинамических и теплофизических устройств требуется исследование структуры потока и процессов, протекающих на уровне колмогоровского масштаба турбулентности, в частности, в пристенной области турбулентного пограничного слоя. Несмотря на то, что в настоящее время в исследовании этой области течений достигнут значительный прогресс, все еще остается ряд нерешенных и интересных для практики вопросов, связанных с влиянием тех или иных процессов, протекающих в этой области, на интересующие инженеров интегральные величины, знание которых необходимо при разработке конкретных технических устройств. К таким величинам относятся, например, сопротивление трения и тепловой поток между теплоносителем и стенкой. Важными с фундаментальной и практической точек зрения являются редкие, но интенсивные события, способные оказывать влияние не только на интегральные величины, но и приводить к работе той или иной техники на нерасчетных режимах, к их повреждению или разрушению. Знание механизмов возникновения таких событий важно не только при предотвращении нежелательных последствий, но и при их целенаправленном использовании в технике.

На сегодняшний день теоретическое (численное) изучение пристенной турбулентности доступно лишь в исследованиях при относительно небольших числах Рейнольдса. Использование современных экспериментальных методов диагностики потоков, таких как PIV (Particle Image Velocimetry), позволяет получить недостающую информацию. Однако исследование редких событий на микромасштабах требует дальнейшего развития этих методов в сторону увеличения их точности, пространственно-временного разрешения и быстродействия.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации, списка цитируемой литературы и списка часто

используемых условных обозначений и сокращений. Работа содержит 324 страницы, включая 123 рисунка и 6 таблиц. Список литературы состоит из 410 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, указаны научная новизна исследования, научная и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов, описан личный вклад соискателя, приведена апробация работы и изложено краткое содержание глав диссертации.

Первая глава диссертации посвящена развитию оптических (панорамных) методов измерения и включает подробный обзор соответствующей литературы. Особое внимание уделяется планарному многопроходному методу PIV, используемому в диссертации в качестве основного экспериментального метода исследования. Отмечается, что специфика темы диссертации, связанная с исследованием редких и интенсивных событий, предъявляет ряд специальных требований к используемому методу. Во-первых, необходимо обеспечение высокого пространственно-временного разрешения метода измерения на уровне колмогоровского масштаба турбулентности. Во-вторых, требуется проведение измерений в условиях наличия широкого диапазона измеряемых скоростей, меняющихся от нуля на стенке канала до величины, выходящей за пределы рекомендуемых на практике величин. В-третьих, необходимо учитывать влияние погрешности измерения, которая в некоторых рассматриваемых в диссертации случаях соизмерима с измеряемыми величинами. В-четвертых, необходима обработка большого объема данных, что требует больших вычислительных ресурсов. Поэтому в первую очередь в диссертации решается задача разработки алгоритмов, ускоряющих вычисление векторных полей скорости потока. Идея предлагаемого подхода состоит в том, что вместо двумерной расчетной области, являющейся своего рода сенсорным элементом в методе PIV, рассматриваются проекции на две ее ортогональные стороны. Данный подход реализован применительно к стандартному и многопроходному методам PIV, а также к методу SIV, предназначенному для нахождения полей скорости по результатам дымовой (аэрозольной) визуализации. Для каждой реализации проводится анализ достигаемого ускорения. В заключительной части первой главы диссертации предложен новый бессеточный многопроходный метод PIV, значительно упрощающий процедуру деформации изображений, призванную для снижения погрешности измерения. Разработанный метод имеет ряд конкурентных преимуществ по отношению к другим современным методам. Одним из таких преимуществ является устранение трудностей, возникающих при деформации изображения в условиях наличия большого количества ошибочных векторов скорости, особенно на границах области измерения. В этом случае метод не требует выполнения процедуры восстановления ошибочных векторов, и, самое главное, позволяет использовать «виртуальные точки» с известными значениями скорости для коррекции результатов измерения вблизи стенок канала. Этот результат представляется наиболее интересным для практики.

Во **второй главе** диссертации проведена сравнительная оценка погрешности разработанных методов и алгоритмов. На основе обработки «синтетических» PIV-изображений с заранее известным распределением векторного поля скорости выполнен статистический анализ влияния таких управляющих параметров, как диаметр и концентрация образцов частиц, величина и градиент их смещения в плоскости светового ножа, размер расчетной области и уровень фонового шума на PIV-изображениях. Также

приведены результаты оценки неопределенности измерения в турбулентном пограничном слое.

Приведены рекомендуемые параметры PIV-изображений, при которых применение алгоритма ускорения к стандартному и многопроходному методам PIV показало их надежность с точки зрения минимизации погрешности измерения. Показаны преимущества метода SIV перед методом PIV с точки зрения минимизации погрешности измерения при обработке слабо зашумленных изображений с большой относительной концентрацией образов частиц большого диаметра. Показано, что применение бессеточного метода PIV позволяет повысить пространственное разрешение и расширить диапазон допустимых градиентов скорости с одновременным снижением погрешности измерения скорости, а также ее первой и второй пространственных производных. Применение этого метода позволило снизить погрешность измерения в вязком подслое турбулентного пограничного слоя, особенно при добавлении в расчет «виртуальных точек» с нулевыми значениями скорости на границе с неподвижной стенкой.

Третья глава диссертации посвящена решению проблемы измерения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (КЭТ) с помощью панорамных методов диагностики потоков. Анализируется влияние основных параметров (факторов) измерения на достоверность оценки скорости диссипации КЭТ. Показано, что единственным способом достоверной оценки скорости диссипации КЭТ по результатам PIV-измерений является снижение влияния погрешности измерения при условии, что достигнуто высокое пространственно-временное разрешение на уровне колмогоровских масштабов турбулентности. Сложность снижения влияния погрешности измерения состоит в том, что она меняется в пространстве и различна для разного набора управляющих параметров, таких как размер расчетной области, диаметр частиц и т.д. В диссертации предложена процедура локальной фильтрации сигнала скорости по времени, частично исключая область частот, в которой погрешность измерения скорости преобладает над истинным значением пульсации скорости. Такой подход возможен при использовании высокоскоростного метода PIV. Результаты рассмотрения модельного сдвигового течения и измерения в турбулентном пограничном слое показали высокую эффективность предложенной процедуры фильтрации с точки зрения минимизации влияния случайной погрешности измерения на оценку скорости диссипации КЭТ.

В заключительной части третьей главы с использованием высокоскоростного планарного метода PIV совместно с разработанной процедурой фильтрации изучен механизм возникновения событий, приводящих к высоким мгновенным локальным значениям скорости диссипации и генерации КЭТ в турбулентном пограничном слое. Показано, что наиболее интенсивные диссипативные события возникают в вязком подслое турбулентного пограничного слоя в результате вращательного движения квазипродольных вихревых структур, которые, в свою очередь, вызывают наиболее высокие мгновенные значения генерации КЭТ в буферной области турбулентного пограничного слоя.

Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальному и численному исследованию так называемого явления обратного пристенного течения (ОПТ). По существу, исследуется локальный мгновенный отрыв потока, характеризующийся, во-первых, малой пространственной протяженностью отрывной области на уровне колмогоровского масштаба длины и, во-вторых, низкой вероятностью их возникновения. Приводится подробное описание особенностей численного и экспериментального методов

исследования этого явления. Следует отметить, что возможность возникновения отрыва потока в условиях практически нулевого продольного градиента среднего давления не очевидна. Интересно, что экспериментально оно было обнаружено лишь в 2015 году по результатам поверхностных измерений при относительно больших числах Рейнольдса. При этом механизм его возникновения до сих пор не был известен. В диссертации впервые экспериментально показана возможность возникновения этого явления при относительно низких числах Рейнольдса ($207 < Re_\tau < 672$) и предложен механизм его возникновения. Выполнено обобщение имеющихся литературных данных и их сопоставление с собственными результатами. Обнаружена зависимость вероятности обратного течения от ее местоположения на стенке канала в поперечном направлении. Оказалось, что она немонотонно возрастает с $\sim 0,01\%$ примерно на три порядка при приближении от центральной области стенки к углу канала. Отмечается, что это связано с различными механизмами их возникновения в этих областях. Таким образом, в диссертации впервые показано существование этого явления при турбулентном течении в угловых конфигурациях, что особенно интересно, учитывая, что на сегодняшний день структура потока при турбулентном течении в таких каналах считалась детально изученной.

Установлена корреляция области обратного течения, возникающего в центральной части стенки канала, с крупномасштабными областями заторможенного и ускоренного течения, расположенными вниз и вверх по потоку от области ОПТ, соответственно, взаимодействие которых приводит к образованию сильного сдвигового слоя на границе их раздела, развивающегося в пристенные поперечные вихревые структуры, из которых наиболее близкие к стенке индуцируют ОПТ. Исследование структуры потока в окрестности углов канала показало, что механизм возникновения событий ОПТ в этой области, связан с вытянутыми в продольном направлении вихревыми структурами, вращательное движение которых вызывает движение жидкости со стороны ядра потока к углу канала, индуцируя при этом событие ОПТ в этой области. Показано, что события, обнаруженные в углах канала, возникают чаще, имеют большее время жизни и проходят большее расстояние за это время, чем события, обнаруженные в центральной области стенки. Установлено, что вероятность ОПТ как в центральной, так и в угловой областях стенки увеличивается с увеличением числа Рейнольдса, однако это увеличение происходит медленнее для событий, возникающих в углах канала.

В заключении сформулированы основные результаты исследований.

Материал диссертации изложен четко и ясно, ссылки на других авторов и источники цитирования указываются корректно.

Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Достоверность полученных в диссертации результатов обусловлена использованием проверенных методик численного и экспериментального исследования, качественным и во многих случаях количественным совпадением полученных результатов с известными результатами других авторов, использованием верифицированных алгоритмов обработки данных и глубоким анализом влияния погрешности измерения на результаты исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый бессеточный многопроходный метод PIV, значительно упрощающий процедуру деформации обрабатываемых PIV-изображений. Метод позволяет расширить диапазон допустимых градиентов скоростей с одновременным повышением пространственного разрешения и снижением количества ошибочных векторов скорости;
2. Разработана серия алгоритмов, значительно ускоряющих вычисление мгновенных векторных полей скорости потока применительно к методам PIV и SIV;
3. Впервые показано совместное влияние случайной погрешности измерения и пространственного разрешения на достоверность оценки скорости диссипации кинетической энергии турбулентности;
4. Разработан метод, частично устраняющий влияние случайной погрешности измерения на оценку скорости диссипации кинетической энергии турбулентности;
5. Описан сценарий формирования высоких локальных мгновенных значений скорости диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности в пристенной области турбулентного пограничного слоя;
6. Впервые экспериментально подтверждено существование явления обратного пристенного течения в каналах при относительно малых числах Рейнольдса ($207 < Re_\tau < 672$), а также предложен и обоснован механизм его возникновения;
7. Впервые обнаружено явление обратного пристенного течения в углах канала квадратного поперечного сечения и предложен механизм его возникновения;
8. Выявлено, что доля времени обратного течения в углах канала примерно на три порядка выше, чем в центральной области стенки канала.

Теоретическая и практическая значимость работы связана с более глубоким пониманием процессов, протекающих в турбулентном пограничном слое, а также обнаружением и объяснением новых явлений и закономерностей, наблюдаемых на уровне колмогоровского масштаба. Нацеленность на интенсивные события в качестве объекта исследования потребовала дальнейшего развития панорамных методов диагностики потоков. Разработанные методы и алгоритмы значительно превосходят по производительности существующие мировые аналоги, открывают новые возможности в экспериментальной механике жидкости и газа, особенно при изучении процессов, протекающих на уровне колмогоровского масштаба, могут быть использованы при разработке следующих поколений панорамных методов, позволяющих измерять мгновенные векторные поля скорости вблизи подвижных границ в режиме реального времени, и могут быть внедрены в промышленные и коммерческие системы диагностики.

По теме диссертации автором опубликовано 17 работ в рецензируемых периодических изданиях, которые входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, из них 14 вошли в международные реферативные базы данных и системы цитирования. Кроме того, имеется ряд публикаций в трудах всероссийских и международных конференций.

Замечания по диссертации:

1. Приведенные в конце Главы 2 (стр.156) оценки точности измерений на основе разработанных алгоритмов представляются слишком оптимистичными. Автор

сравнивает профили пульсаций продольной и поперечной компонент скорости с данными численных расчетов и дает оценку полной погрешности измерений (смещений трассеров) в пограничном турбулентном слое на уровне 0.01 пикселя, то есть на уровне случайной ошибки используемых алгоритмов. Такой низкий уровень погрешности действительно удается достичь, но только на синтетических изображениях, а на реальных изображениях, полученных в экспериментах, погрешность измерений, как правило, на порядок выше, в силу больших градиентов скорости, несферичности трассеров, зашумленности изображений и т.д. (смотрите например Raffel, 2018).

2. В качестве основного метода для экспериментального изучения турбулентного течения в пограничном слое используется time-resolved PIV. Это позволяет изучить эволюцию когерентных структур, однако использование высокоскоростных камер обуславливает сравнительно низкое качество изображений и малый размер измерительной области. Так как объектом исследований является стационарное турбулентное течение, то восстановление его характеристик (распределения средней скорости и турбулентных пульсаций) можно реализовать при помощи независимых измерений стандартным PIV методом, на основе двухкадровой съемки камерами высокого разрешения, что позволило бы существенно повысить точность измерений и увеличить область измерений.
3. Вывод о том, что наиболее интенсивные события скорости диссипации КЭТ возникают в вязком подслое ТПС в результате сильного вращательного движения квазипродольных вихревых структур не представляется строго доказанным в силу того, что измерение завихренности этих структур не доступно в рамках методов, используемых диссертантом. Данный вывод можно считать лишь предположением, которое не противоречит известным наблюдениям и моделям.
4. При представлении результатов автор широко пользуется «колмогоровским масштабом», но, к сожалению, не обсуждает особенности применения этого ключевого понятия теории турбулентности к рассматриваемым задачам. Дело в том, что масштаб Колмогорова введен для однородной и изотропной турбулентности и определяется средней скоростью диссипации энергии. В работе же рассматриваются пограничные слои, причем с упором на структуры с экстремальными значениями скорости диссипации энергии. Насколько правомочно пользоваться в этом случае понятием колмогоровского масштаба, как его корректно определить и какие условия нужно оговорить, стоило бы обсудить подробно.

Заключение

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки представленной диссертации и не носят принципиального характера. Диссертация Зарипова Динара Ильясовича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных соискателем исследований разработаны теоретические положения, направленные на исследование интенсивных событий в турбулентном пограничном слое и разработку высокоточных и высокопроизводительных панорамных методов диагностики потоков, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное достижение в области механики жидкости и газа.

Исходя из актуальности, новизны, научной и практической значимости данной работы, можно сделать заключение, что диссертация «Развитие высокопроизводительных панорамных методов диагностики и их приложение к исследованию интенсивных событий в турбулентном пограничном слое», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы, выполнена на высоком научном уровне, удовлетворяет всем критериям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Зарипов Динар Ильясович заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук.

Данный отзыв обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре лаборатории физической гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» 31 января 2022 года (присутствовало 28 человек, в том числе 6 докторов наук по профилю диссертации, протокол №22-2).

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией физической гидродинамики
ИМСС УрО РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор



Фрик Пётр Готлобович

+7 (342) 237-83-22, frick@icmm.ru, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1
15 февраля 2022 года

Сведения об организации:

Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»)

Почтовый адрес: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д.1

Телефон: +7 (342) 237-84-61

Адрес электронной почты: mvp@icmm.ru

Адрес сайта: <https://www.icmm.ru>