

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора

Фрика Петра Готлобовича

на диссертацию Шестакова Максима Владимировича «Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность диссертационной работы

Широкий класс течений, реализующихся в природных и технических системах, представляет собой квазидвумерные турбулентные сдвиговые течения. Примерами таких течений являются астрофизические и геофизические течения, устойчиво стратифицированные течения в следах, формирующихся в атмосфере и океане, а также течения проводящих сред в сильных магнитных полях. Квазидвумерные турбулентные сдвиговые (щелевые) течения обладают некоторыми свойствами двумерной турбулентности, которые проявляются вследствие ограничения течения в одном из трех направлений движения. Особенностью двумерной турбулентности является возможность формирования двух инерционных интервалов, соответствующих прямому каскаду энтропии и обратному каскаду энергии. В квазидвумерных турбулентных сдвиговых течениях на различных масштабах возможно появление свойств как двумерной, так и трехмерной турбулентности, что делает такие течения сложной многопараметрической задачей для численного и физического моделирования. Сложность заключается в необходимости одновременного разрешения широкого диапазона масштабов движения, относящихся к области трехмерной и двумерной турбулентности, а также корректное моделирование диссипации энергии в области больших и малых волновых чисел. Исследование таких динамических систем необходимо для развития моделей квазидвумерной турбулентности и теории турбулентности в целом, что обуславливает актуальность работы с фундаментальной точки зрения.

Квазидвумерное турбулентное течение в узких зазорах и щелевых каналах наиболее часто реализуются в энергетических установках, системах охлаждения электроники и теплообменных аппаратах. В энергетических системах эффективность работы теплоносителя определяется структурой

турбулентности и скоростью его движения. Главная особенность структуры квазидвумерного турбулентного сдвигового течения состоит в сосуществовании крупномасштабных двумерных турбулентных движений, определяющих перенос на большие расстояния в горизонтальной плоскости течения, и трехмерных турбулентных движений, влияющих на процессы перемешивания и теплообмена в вертикальном направлении. Отвод тепла от стенки в значительной степени определяется статистическими характеристиками нормальной к стенке компоненты скорости, которая, учитывая малую высоту каналов, остается мало изученной. Таким образом, исследование трехмерной структуры квазидвумерного турбулентного сдвигового течения с целью получения новых экспериментальных данных о статистических характеристиках всех трех компонент скорости определяет актуальность работы с практической точки зрения. Применение и апробация новых современных методов исследования пространственной структуры течения в условиях ограниченности потока, на примере метода Tomographic PIV, также является актуальной задачей для развития инструментария и расширения возможностей для получения новых знаний о трехмерной вихревой топологии течений в области механики жидкости и газа.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 216 страницах, содержит 112 рисунков и 5 таблиц. Библиографический список включает 203 наименования работ.

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, сформулирована новизна и практическая значимость работы.

В первой главе, состоящей из двух разделов, проведен обзор экспериментальных и численных исследований затопленных квазидвумерных турбулентных струй и следов. На основе анализа литературы обоснованы цели и задачи, показана необходимость исследования пространственной структуры течения, основанного на измерении мгновенных распределений трех компонент скорости.

Вторая глава посвящена описанию методик измерения и экспериментальным установкам, использованным в работе. В диссертации для исследования пространственной вихревой структуры квазидвумерных турбулентных сдвиговых течений используются ряд панорамных оптических методов, таких как PIV (Particle Image Velocimetry), томографический PIV (Tomographic PIV), а также PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). В главе представлены основные этапы реализации выбранных методик, освещены вопросы, касающиеся выбора оптимальных параметров, таких как размер трассеров, расположение источников освещения. Описаны принципы работы измерительной системы, алгоритмы обработки изображений трассеров, а также представлены основные источники неопределенности методов. В

заключительной части главы представлено описание экспериментального гидродинамического контура и рабочих участков.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования динамики крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в результате истечения турбулентной струи в вертикальный щелевой канал в широком диапазоне параметров чисел Re и значений соотношения h/D – высоты канала к ширине сопла. Исследования проведены при помощи двумерных реализаций PIV и PLIF методов с высоким временным разрешением. Благодаря высокоскоростным конфигурациям измерительных систем получены новые знания о мгновенной структуре слоя смешения квазидвумерной турбулентной струи в щелевом канале. Например, впервые зарегистрированы продольные структуры, обнаружено ранее ненаблюдаемое явление модуляции амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи. В широком диапазоне параметров получены количественные данные о динамике квазидвумерных вихревых структур, построены спектральные плотности энергии пульсаций скорости, показано влияние квазидвумерности течения на форму спектра. Представлен большой объем экспериментальных данных, характеризующих эволюцию осредненных и пульсационных характеристик течения вдоль канала при различных числах Рейнольдса и различных параметрах сопла (отношения h/D).

Четвертая глава описывает результаты исследования трехмерной структуры квазидвумерной турбулентной струи в щелевом канале при помощи Томо-PIV метода с высоким временным разрешением в диапазоне чисел Re от 5 000 до 20 000. На основе экспериментальных данных – трехмерных трехкомпонентных распределений мгновенной и средней скорости, подтверждено наличие вторичных течений в ближнем поле струи, показано влияние вторичных течений на структуру осредненного течения. Представлены экспериментальные данные, указывающие на связь вторичных течений с мгновенной трехмерной вихревой структурой течения, обусловленную продольными вихревыми структурами. Результаты Томо-PIV экспериментов впервые позволили исследовать трехмерную динамику вихревых структур и обнаружить два типа вихревых структур – продольные вихревые структуры и сдвиговые вихревые структуры Кельвина-Гельмгольца. Представлен обширный экспериментальный материал по трехмерным полям различных характеристик турбулентного поля скорости (поля завихренности и поля компонент завихренности, поля так-называемого Q -критерия и его двумерного аналога). Материал обширен и явно «недообсужден» (см. замечания внизу), но ценность его от этого не уменьшается.

В пятой главе описаны результаты исследования трехмерной структуры квазидвумерного турбулентного следа за цилиндром в щелевом канале, полученные при помощи Томо-PIV метода с высоким временным разрешением. Представлены трехмерные экспериментальные данные о динамике сдвиговых вихревых структур, концевых участков подковообразных вихревых структур, а также о системах продольных вихревых структур, образующихся в квазидвумерном турбулентном следе за цилиндром. Впервые в ближнем поле следа за цилиндром обнаружены внутренние и внешние вторичные течения, идентифицируемые как два квадрупольных распределения продольной завихренности.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации. Выдвинутые на защиту научные положения и выводы подтверждены и обоснованы в полной мере на основе проведенного логического анализа полученных результатов, сравнения полученных в диссертационной работе экспериментальных данных с имеющимися в литературе данными экспериментов и численных расчетов, а также на основе оценок достоверности экспериментальных данных, полученных при помощи апробированных методик измерения.

Научная и практическая значимость полученных результатов состоит в полученных новых знаниях о трехмерной топологии и динамике вихревых структур, а также о взаимодействии вихревых структур различных масштабов, образующихся в сложных квазидвумерных анизотропных турбулентных сдвиговых течениях. Полученные экспериментальные данные о спектральных зависимостях каждой компоненты скорости имеют важное значение для развития теории квазидвумерной турбулентности. С практической точки зрения полученные экспериментальные данные о впервые обнаруженных продольных вихревых структурах в квазидвумерных турбулентных сдвиговых течениях, которые могут играть определяющую роль в процессах смешения и теплообмена, необходимо учитывать при проектировании и разработке современного высокоэффективного энергетического оборудования. Полученная обширная экспериментальная база данных по трехмерным трехкомпонентным распределениям скорости с высоким временным разрешением является основой верификации современных существующих и разрабатываемых расчетных кодов. Обнаруженная связь между генерацией продольных вихревых структур и сдвиговых вихревых структур, а также наличие характерных безразмерных частот генерации данных структур указывает на возможность создания эффективных методов управления степенью интенсификации процессов смешения и тепломассообмена, что в условиях миниатюризации

высокоэффективных энергетических технологий может иметь определяющее значение.

Достоверность и научная новизна полученных результатов.

Достоверность результатов обеспечивается: проведением специальных тестовых экспериментов, использованием хорошо апробированных экспериментальных методов, проведением калибровки измерительной системы, повторяемостью экспериментальных данных, оценкой неопределенности измерений, сравнением результатов диссертационной работы с результатами, полученными другими хорошо апробированными методами, сопоставлением с экспериментальными данными, полученными другими авторами. В качестве новизны диссертационной работы следует отметить следующее: апробацию и применение нового метода, позволяющего измерять трехкомпонентные распределения скорости в объеме ограниченного потока, впервые проведенные измерения трехмерных мгновенных трехкомпонентных распределений скорости с высоким временным разрешением в квазидвумерной турбулентной струе и следе, впервые экспериментально обнаруженные продольные вихревые структуры в квазидвумерных турбулентных струях и следах в щелевых каналах.

Замечания по диссертации

1. Мимо внимания диссертанта прошел, к сожалению, целый пласт работ по квазидвумерной турбулентности. Автор честно описал основную литературу по пристеночным струям и струям в щелях. К сожалению, остались в стороне работы по квазидвумерной турбулентности (не струйной). Все эксперименты по 2D турбулентности выполнены на самом деле в квазидвумерной постановке, например турбулентные течения в слоях и пленках, либо течения в сильных магнитных полях. Если первые интересны в контексте данной работы скорее в общеидеологическом плане, то сравнение с развитием турбулентной струи проводящей жидкости в сильном магнитном поле (работы Сикорианского с соавторами, Зиканова с соавторами, свежие работы Беляева с соавторами и др.) могло бы быть чрезвычайно интересно. Просматриваемая аналогия состоит в том, что турбулентный поток за решеткой в магнитном поле зависит от того, стоит ли решетка в поле или до входа потока в поле (двумеризуется поток до решетки, или после), а струйный поток в щели зависит от геометрии сопла (струя на входе уже плоская или трехмерная, которой ограничения по ширине навязываются позже). Было бы также интересно в контексте данной работы обсудить переход от 2D к 3D, изучавшемся, например, путем навязывания разных законов сохранения в разных частях пространства Фурье (Boffetta et al.).
2. На мой взгляд, при имеющемся богатейшем экспериментальном материале, автор необоснованно сэконобил на его всестороннем анализе. Развернутое обсуждение изменяющейся вдоль потока структуры струи

можно было бы проиллюстрировать более тщательным спектральным и статистическим анализом мелкомасштабной турбулентности. В работе всего лишь 4 спектра, и все частотные. Зная в деталях поле скорости, легко пересчитать их в пространственные спектры, рассматривание которых существенно более информативно, так как наглядно видно, как соотносятся переходы от одного типа спектральных законов к другим с ключевыми масштабами задачи. Интересно было бы взглянуть на скомпенсированные спектры (то есть отнесенные к ожидаемым степенным законам). Думается, что обеспечиваемая экспериментом точность допускает и анализ статистических моментов высших порядков, которые ведут себя в трехмерии и двумерии по-разному.

3. Определенную неудовлетворенность оставляет обсуждение обширнейшего экспериментального материала четвертой главы. Представлены красивые трехмерные поля распределения завихренности и ее компонент, Q-критерия и его двумерного аналога, но хорошего текста, объясняющего, что можно вынести из этих живописных картин, не хватает. Как интерпретировать распределение Q-критерия (например, рис.4.2.4) и его двумерного аналога (для которого даже формулы нет) – рис.4.2.7 или 4.2.9. Безусловно, требует обсуждения вопрос о последовательности действий: стоит ли рисовать трехмерное поле двумерного критерия, или сначала нужно отфильтровать двумерные поля и показывать двумерные поля этого критерия. На масштабах, меньших толщины слоя, двумерный критерий теряет смысл.
4. Среди мелких и технических ошибок отмечу, что в работе появляются неописанные символы и обозначения (например, постоянно перемежаются d и D , причем в автореферате D описана только на странице 12, хотя используется много раньше, а d используется в рисунках и формулах без комментариев), а также, не всегда корректный лексикон (например, «анализ линейной устойчивости» вместо «линейный анализ устойчивости», «неустойчивость возрастает», «трехмерная плоская струя», «уменьшение актов объединения» и пр.).

Заключение

Диссертация М.В. Шестакова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно, содержит результаты экспериментальных исследований, вносящие фундаментальные знания о пространственной структуре квазидвумерных турбулентных сдвиговых течений, соответствующие критерию новизны.

Диссертация М.В. Шестакова соответствует специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи диссертации, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации М.В. Шестакова «Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах» можно сделать обоснованное заключение о том, что диссертация соответствует требованиям п. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Максим Владимирович Шестаков заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
профессор, заведующий Лабораторией физической гидродинамики
Институт механики сплошных сред ФГБУН ПФИЦ УрО РАН

07.02.2022

Фрик Петр Готлобович

Подпись П.Г. Фрика удостоверяю:
Ученый секретарь
ИМСС УрО РАН



Юрлова Наталия Алексеевна

Почтовый адрес:

614013, Россия, г. Пермь,

ул. Академика Королёва, 1;

Телефон: +7 (342) 237-84-61; <https://www.icmm.ru/>

Адрес электронной почты: mvp@icmm.ru

Наименование 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