

На правах рукописи



Шестаков Максим Владимирович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ
СТРУКТУРЫ КВАЗИДВУМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ И
СЛЕДОВ В ЦЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), г. Новосибирск.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, академик РАН Маркович Дмитрий Маркович

Официальные оппоненты:

Фрик Петр Готлобович – доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Кафедра общей физики, профессор; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Лаборатория физической гидродинамики № 4, заведующий.

Качанов Юрий Семенович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН) г. Новосибирск, Лаборатория № 8 Аэрофизических исследований дозвуковых течений, главный научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГиЛ СО РАН), г. Новосибирск.

Защита состоится «2» марта 2022 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН, www.itp.nsc.ru

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.1.129.01 по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

(e-mail: dissovet@itp.nsc.ru)

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Широкий класс течений, реализующихся в окружающей среде и ряде технических приложений, в силу существенно различающихся геометрических масштабов, демонстрируют свойства двумерной турбулентности. Примером таких сдвиговых квазидвумерных течений могут служить устойчиво стратифицированные течения в следах, формирующихся в атмосфере и океане, течения в области слияния рек, а также технологические стоки в водоемы малой глубины. Крупномасштабные квазидвумерные долгоживущие вихревые структуры, формирующиеся вследствие развития поперечной сдвиговой неустойчивости, играют важную роль в процессах переноса.

В технике такие течения наиболее часто реализуются в установках атомной энергетики, системах охлаждения электроники, энергетических теплообменных аппаратах, а также аппаратах химических технологий. Характеристики и свойства течений в узких (щелевых) каналах важно учитывать при разработке и проектировании ряда технических устройств и аппаратов. Эффективность теплообмена в таких каналах целиком определяется структурой турбулентности и скоростью движения жидкости в них. Главная особенность структуры квазидвумерного течения состоит в сосуществовании крупномасштабных двумерных турбулентных движений, которые определяют перенос на большие расстояния, и трехмерных турбулентных движений масштаба меньше поперечного размера канала, которые существенно влияют на процессы перемешивания и теплообмена. Кроме того, квазидвумерная геометрия течения дает широкие возможности для управления спектром турбулентных пульсаций, поскольку позволяет контролировать потоки энергии по спектру, как в прямом, так и в обратном направлениях, обеспечивая таким образом управление степенью интенсификации или подавления процессов переноса. Квазидвумерные турбулентные сдвиговые течения являются наиболее сложными для численного и физического моделирования в силу необходимости одновременного разрешения широкого диапазона масштабов, которые относятся к области трехмерной и двумерной турбулентности, реализуемых в потоке. Эффективное использование квазидвумерных сдвиговых течений в современных высокоэффективных энергетических технологиях требует

количественных знаний о влиянии масштабных эффектов на динамику квазидвумерного сдвигового течения, процессах образования и распада крупномасштабных вихревых структур, а также о взаимосвязи между структурами различного масштаба. Такую информацию невозможно получить без детального экспериментального исследования пространственной трехмерной структуры потока с высоким пространственным и временным разрешением.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование закономерностей формирования, развития и взаимодействия трехмерных вихревых структур, образующихся в квазидвумерных сдвиговых турбулентных течениях, в частности, струях и следах в щелевых каналах, определение степени влияния эффектов двумерной турбулентности на развитие изучаемых течений, а также получение исчерпывающего набора количественных данных, позволяющих оценить влияние вихревых структур на процессы смешения и тепломассопереноса.

В соответствии с указанной целью были поставлены следующие **задачи**:

применение и апробация методов анемометрии по изображениям частиц, основанных на малоракурсной оптической томографии (Tomographic PIV), для измерения трехмерных трехкомпонентных распределений скорости в квазидвумерных турбулентных сдвиговых течениях в щелевых каналах;

проведение высокоскоростной визуализации при помощи метода лазерной индуцированной флуоресценции (PLIF) пространственной структуры квазидвумерной турбулентной струи, развивающейся в щелевом канале, для определения характерных временных и пространственных масштабов;

измерение мгновенных полей скорости при помощи метода PIV в квазидвумерной турбулентной струе, развивающейся в щелевом канале в широком диапазоне чисел Рейнольдса и различных соотношений глубины канала к ширине сопла для исследования влияния соотношения инерционных сил и сил трения на структуру и динамику квазидвумерной струи;

измерение мгновенных трехмерных трехкомпонентных распределений скорости, формирующихся при течении квазидвумерной турбулентной струи и следа в щелевом канале при помощи томографического PIV метода с высоким временным разрешением для определения трехмерной топологии вихревых структур, формирующихся в объеме потока.

Научная новизна.

Впервые экспериментально исследована динамика крупномасштабных вихревых структур в квазидвумерной турбулентной струе в широком диапазоне чисел Рейнольдса и диапазоне соотношения ширины струи к глубине канала от 0,11 до 0,4. Впервые обнаружена модуляция амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи и показана ее связь с процессами образования и объединения вихревых структур.

Впервые измерены трехмерные трехкомпонентные мгновенные и осредненные распределения скорости в потоке квазидвумерной турбулентной струи и следа за цилиндром с помощью метода Томо-PIV с высоким временным разрешением. Впервые экспериментально получены данные о динамике трехмерной мгновенной вихревой структуры квазидвумерной струи и следа.

Впервые экспериментально обнаружены продольные вихревые структуры в течении квазидвумерной турбулентной струи и следа.

Впервые показано, что при обтекании ограниченного цилиндра с соотношением высоты цилиндра к диаметру 0,4 формируются два квадрупольных распределения продольной завихренности, соответствующие внешним и внутренним вторичным течениям. Определена область влияния вторичных течений на осредненную структуру квазидвумерной турбулентной струи и следа.

Впервые по экспериментальным данным рассчитаны спектры пульсаций трех компонент скорости в квазидвумерной турбулентной струе и следе.

Теоретическая и практическая значимость.

Полученные экспериментальные данные о трехмерной пространственной структуре квазидвумерных турбулентных сдвиговых течений дают представление о процессах формирования и взаимодействия вихревых структур в объеме потока, что позволяет разрабатывать эффективные методы управления смещением и тепломассопереносом. Спектральные зависимости для кинетической энергии турбулентности, рассчитанные по трем компонентам скорости, экспериментально полученным в одни и те же моменты времени, позволяют развивать и апробировать новые модели турбулентности для анизотропных квазидвумерных турбулентных потоков. Обнаруженная в данной работе взаимосвязь между развитием квазидвумерных крупномасштабных вихревых структур и продольных вихревых структур, определенные их характерные пространственные и

временные масштабы необходимо учитывать при разработке моделей и численных кодов для описания процессов тепломассообмена в энергетических и химических установках. Новые данные о трехмерной структуре при обтекании цилиндра и распространении струи в щелевом канале, а также о наличии в потоке продольных вихревых структур позволят разрабатывать высокоэффективные пластинчатые теплообменники, оптимизировать внутреннюю конструкцию систем охлаждения газотурбинных лопаток и микроэлектроники, процессы теплообмена в компактных тепловыделяющих сборках. Полученная обширная экспериментальная база данных по трехмерным трехкомпонентным распределениям скорости с высоким временным разрешением является основой для верификации современных существующих и создаваемых расчетных кодов.

На защиту выносятся:

Результаты экспериментов по исследованию динамики крупномасштабных вихревых структур, развивающихся в условиях сильной анизотропии течения в квазидвумерной турбулентной струе, позволяющие определить характерные временные и пространственные масштабы течения.

Результаты экспериментов по исследованию трехмерных трехкомпонентных распределений скорости в квазидвумерной струе, полученные с высоким временным разрешением, позволяющие анализировать пространственную топологию и динамику трехмерных вихревых структур.

Энергетические спектры пульсаций, рассчитанные для каждой компоненты скорости в квазидвумерной турбулентной струе, позволяющие определить области применения различных моделей к описанию течений, имеющих признаки как двумерной турбулентности, так и существенно трехмерных эффектов.

Результаты экспериментов по исследованию трехмерных трехкомпонентных распределений скорости в квазидвумерном следе, полученные с высоким временным разрешением, позволяющие анализировать процессы взаимодействия вихревых структур в следе за цилиндром.

Достоверность результатов обеспечивается: проведением специальных тестовых экспериментов, использованием хорошо апробированных экспериментальных методов, проведением калибровки измерительной системы, повторяемостью экспериментальных данных, оценкой погрешности измерений, сравнением результатов данной работы с результатами,

полученными другими хорошо апробированными методами, сопоставлением с экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Личный вклад соискателя. Постановка задач исследования осуществлена совместно с научным руководителем академиком РАН Марковичем Д.М. Проектирование и изготовление рабочих участков производилось лично автором. Проведение экспериментов по измерению двумерных полей скорости в квазидвумерной турбулентной струе, эксперименты по скоростной PIV визуализации и скоростным измерениям мгновенных полей скорости PIV методом в квазидвумерной турбулентной струе, эксперименты по высокоскоростным томографическим PIV измерениям трехкомпонентных мгновенных распределений скорости в квазидвумерной струе и следе за цилиндром выполнены лично автором. Обработка результатов, полученных при помощи PIV метода, высокоскоростного PIV и PLIF метода в квазидвумерной турбулентной струе, а также при помощи томографического PIV метода высокого временного разрешения в квазидвумерной турбулентной струе и следе проводилась лично автором. Расчет мгновенных и осредненных полей скорости, а также полей пульсаций скорости для 2D и 3D измерений, а также анализ полученных экспериментальных результатов проводился лично автором. Написание научных статей проводилось с непосредственным участием автора.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: International Conference Turbulence, Heat and Mass Transfer (Dubrovnik, Croatia 2006, Rio de Janeiro, Brazil, 2018); International Symposium on Turbulence Shear Flow Phenomena (Munich, Germany, 2007, Melbourne, Australia, 2015); 5th International Symposium Particle Image Velocimetry (Roma, Italy, 2007); 5th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems HEAT (Bialystok, Poland, 2008); International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (Lisbon, Portugal, 2012, 2014, 2016); 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (Naples, Italy, 2015); Euromech Colloquium [581] Dynamics of Concentrated Vortices (Novosibirsk, Russia, 2016); 13th Asian Symposium on Visualization (Novosibirsk, Russia 2016); Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидрогазодинамика» (Ялта, Россия, 2016, 2017); Всероссийская научная конференция «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, Россия,

2010, 2014, 2015, 2016, 2018); Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Новосибирск, Россия, 2015); Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков» (Москва, Россия, 2009, 2011, 2015, 2019). Результаты диссертации, вошли в перечень важнейших результатов фундаментальных исследований Института теплофизики СО РАН в 2014 году.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 40 работ, включая 25 статей, в том числе 8 статей – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе диссертации, состоящей из двух разделов, проведен обзор экспериментальных и численных исследований затопленных квазидвумерных турбулентных струй и следов.

В первом разделе представлен обзор работ по исследованию свободных, пристенных, ограниченных турбулентных струй, а также обзор имеющихся работ по исследованию квазидвумерных турбулентных струй. Влияние близко расположенных ограничивающих стенок приводит к изменению законов распространения турбулентных струй, динамики и топологии вихревых структур, а также структуры спектральных характеристик турбулентности. В структуре квазидвумерной турбулентной струи, распространяющейся между двумя параллельными стенками, расположенными на расстоянии порядка ширины сопла, можно выделить три характерных участка: участок «двумерной» турбулентной струи, участок влияния вторичных течений и участок квазидвумерного турбулентного течения. Основной особенностью квазидвумерных турбулентных струй является образование устойчивых

крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур, масштаб которых увеличивается вниз по потоку. Формирование устойчивых крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур изменяет распределение кинетической энергии турбулентности по масштабам. Наличие близко расположенных ограничивающих стенок приводит к значительному влиянию придонного трения на устойчивость и законы распространения квазидвумерной турбулентной струи. Анализ линейной устойчивости квазидвумерной турбулентной струи показывает, что устойчивость струи зависит от параметра устойчивости $S = c_f \cdot 2D/h$ и числа Рейнольдса, определенного по полуширине струи, половине скорости на оси струи и турбулентной вязкости. В результате влияния придонного трения зависимость затухания осевой скорости и скорость раскрытия струи приобретают нелинейный характер. Появившиеся в недавнем времени работы по исследованию структуры течения в направлении нормальном к ограничивающей стенке показывают, что крупномасштабные квазидвумерные вихревые структуры в виде вихревого диполя приводят к формированию трехмерных продольных вихревых структур. Анализ литературы показывает, что трехмерная структура ограниченных турбулентных струй при $h/D < 1$ остается мало изученной, механизм формирования вторичных течений до конца не исследован, данные трехмерного исследования ограниченных турбулентных струй необходимо верифицировать, кроме того, необходимо определить обоснованность описания квазидвумерных турбулентных струй моделями, основанными на усреднении уравнений движения по глубине канала.

Во *втором разделе* представлен обзор работ по исследованию свободных, пристенных, ограниченных турбулентных следов, а также квазидвумерных турбулентных следов при обтекании цилиндров. Структура течения при обтекании цилиндра характеризуется вихревой дорожкой Кармана. Наличие ограничивающих стенок приводит к формированию системы подковообразных вихревых структур, которые в зависимости от характеристик набегающего потока могут иметь стационарный и нестационарный характер. Обтекание цилиндра, ограниченного стенками с торцов, сопровождается формированием двух систем подковообразных вихревых структур в областях сопряжения цилиндр-стенка. При влиянии придонного трения, в случае близкорасположенных ограничивающих стенок, при котором соотношение расстояния между стенками к диаметру сопла $h/D < 1$, динамика течения квазидвумерного следа зависит от двух параметров:

устойчивости S и числа Рейнольдса. Обзор экспериментальных и численных работ по обтеканию цилиндра в тонком слое жидкости показывает, что в следе за цилиндром могут образовываться продольные вихревые структуры. Также на основании численного моделирования было показано, что при уменьшении h/D обтекание цилиндра сопровождается формированием системы продольных вихревых структур в дальнем поле следа. Таким образом, неисследованными остаются вопросы о влиянии близко расположенных систем подковообразных вихревых структур на формирование и развитие сдвиговых вихревых структур дорожки Кармана, механизмах формирования систем продольных вихревых структур при наличии двух ограничивающих стенок при $h/D < 1$. Экспериментальные работы по исследованию трехмерной топологии вихревых структур в ближнем поле следа при обтекании ограниченного цилиндра отсутствуют.

Вторая глава посвящена описанию методик измерения и экспериментальным установкам, использованных в работе. Наиболее апробированным панорамным оптическим методом для исследования пространственной вихревой структуры является метод PIV (Particle Image Velocimetry), основанный на цифровой регистрации пространственных распределений трассеров в потоке. Метод PIV является бесконтактным, обладает широким динамическим диапазоном измеряемых скоростей, позволяет измерять поле мгновенной скорости в потоке. В главе представлены основные этапы применения методики PIV, освещены вопросы, касающиеся выбора трассеров, источников освещения и регистрации трассеров. Описаны принципы работы измерительной системы, алгоритмы обработки изображений трассеров, а также представлены основные источники неопределенности PIV метода.

Измерение трех компонент скорости в сильно анизотропном турбулентном сдвиговом течении при наличии ограничивающих стенок является сложной экспериментальной задачей. Сложность заключается в одновременном разрешении широкого диапазона масштабов, которые относятся к области трехмерной и двумерной турбулентности, в частности в измерении нормальной к стенке компоненты скорости, которая на один-два порядка меньше компонент скорости в горизонтальном направлении. Методы LDA и плоскостной PIV не позволяют проводить измерения нормальной к стенке компоненты скорости в связи с осреднением данных по объему опроса или толщине лазерного ножа, которые составляют порядка 1 мм, что является

критическим значением для измерения в миллиметровых каналах. В настоящее время наиболее развитым и апробированным методом, позволяющим измерять трехмерное трехкомпонентное распределение скорости в объеме потока, является томографический PIV (Томо-PIV) метод, скоростные конфигурации которого позволяют исследовать трехмерную динамику вихревых структур в нестационарных течениях. Основные шаги применения методики Томо-PIV метода представлены на Рисунке 1. В работе представлены рекомендации для выбора основных параметров для успешного применения Томо-PIV метода, таких как получение объемной засветки, выбор плотности засева трассеров, расположение регистрирующего оборудования. Описаны процедура калибровки измерительной системы, алгоритм самокалибровки по изображениям трассеров, этапы предварительной обработки изображений, а также этап реконструкции объемных распределений трассеров. Представлено краткое описание алгоритмов обработки расчета скорости, а также описаны показатели качества и основные источники неопределенности Томо-PIV измерений.

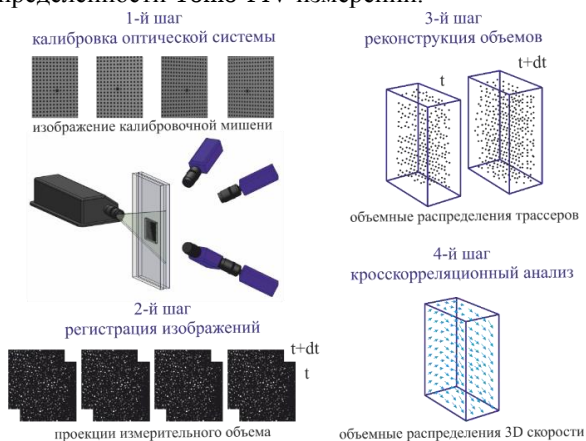


Рисунок 1. Схема применения Томо-PIV метода.

Оптический панорамный бесконтактный метод PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence), основанный на флуоресценции веществ, был выбран для высокоскоростной визуализации крупномасштабных движений квазидвумерной турбулентной струи. Представлена теоретическая основа и описаны схемы реализации метода PLIF, а также описана процедура его

калибровки. В заключительной части главы описан экспериментальный гидродинамический контур и используемые рабочие участки, представленные на Рисунке 2.

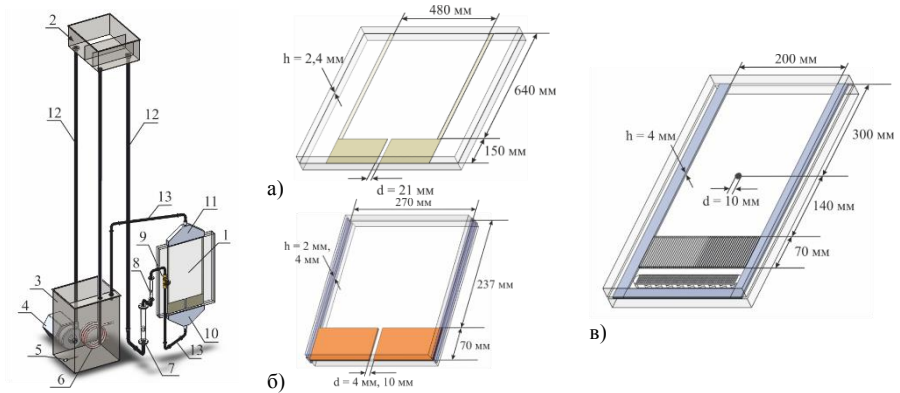


Рисунок 2. Слева: гидродинамический стенд. 1 – Рабочий участок, 2 – бак верхнего уровня, 3 – приемный бак, 4 – насос, 5 – термометр сопротивления, 6 – шланг, 7,8 – ротаметры, 9 – регулирующий вентиль, 10 – диффузор, 11 – конфузор, 12,13 – система трубопроводов. Справа: а) – большой канал, б) малый канал, в) рабочий канал с цилиндром.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования динамики крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в результате истечения турбулентной струи в вертикальный щелевой канал при помощи планарного PIV и PLIF методов с высоким временным разрешением. Эксперименты проводились в широком диапазоне чисел $Re=2h \times U_q/v$ от 5 000 до 20 000 для трех значений соотношения высоты канала h и ширины сопла D , $h/D = 0,11, 0,2$ и $0,4$ на большом канале (Рисунок 2 а, справа). PLIF визуализация позволила зафиксировать мгновенную структуру слоя смешения квазидвумерной турбулентной струи в щелевом канале и впервые зарегистрировать продольные структуры, с линейным масштабом, на порядки превышающим глубину канала (Рисунок 3 а). Исследована динамика течения и обнаружено ранее ненаблюдаемое явление модуляции амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи (Рисунок 3 б и в). Представлено описание наблюдаемого явления, которое связано с циклической сменой режимов течения, соответствующих варикозной и синусоидальной модам неустойчивости струи.

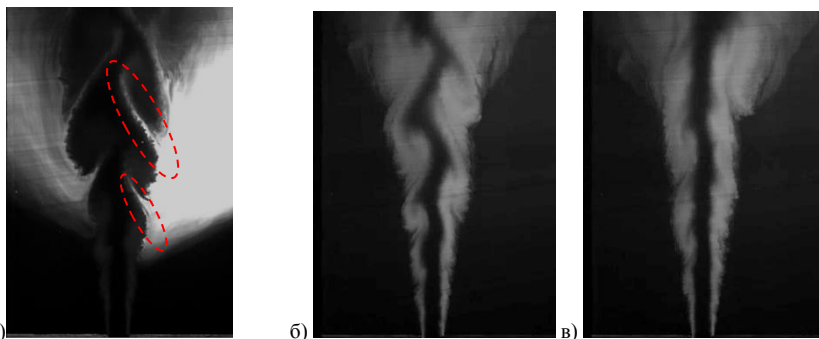


Рисунок 3. Мгновенные распределения флуорофора, демонстрирующие: продольные структуры (а) и явление модуляции амплитуды меандрирования (б и в).

Высокоскоростные PIV измерения позволили количественно исследовать динамику квазидвумерных вихревых структур, процессы слияния вихревых структур и увеличение масштаба квазидвумерных вихревых структур вниз по потоку. На основе рассчитанных одномерных временных спектров пульсаций скорости показано, что в квазидвумерной турбулентной струе реализуются формы энергетического спектра пульсаций, указывающие на проявление свойств квазидвумерной турбулентности (Рисунок 4). При увеличении числа Re наклон в спектре пульсаций скорости изменяется с $-5/3$ до -4 , при этом безразмерная частота, соответствующая спектральному максимуму, сдвигается в длинноволновую часть спектра (Рисунок 4 б).

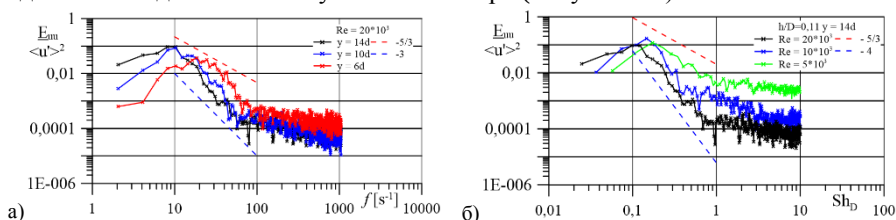


Рисунок 4. а) трансформация формы спектра пульсаций скорости вниз по потоку, б) влияние числа Re на форму спектра пульсаций скорости.

На основе полученных экспериментальных данных показано, что зависимость частоты меандрирования вниз по потоку качественно описывается зависимостью $f \sim (y/d)^{-3/2}$ в широком диапазоне исследуемых параметров (Рисунок 5).

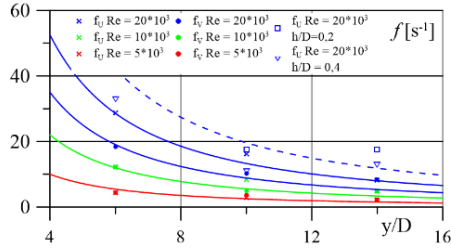


Рисунок 5. Зависимость частоты меандрирования от продольной координаты.

Показано, что влияние придонного трения вследствие наличия близкорасположенных ограничивающих стенок существенно изменяет распределения средних и пульсационных характеристик квазидвумерной турбулентной струи, и структура струи становится не автомодельной. Законы распространения квазидвумерной турбулентной струи в значительной степени зависят от Re и h/D и отличаются от законов распространения трехмерных свободных и ограниченных турбулентных плоских струй (Рисунки 6 и 7). Показано, что при $h/D < 1$ законы затухания осевой скорости и расширения струи зависят от коэффициента трения c_f и носят экспоненциальный характер (Рисунок 6).

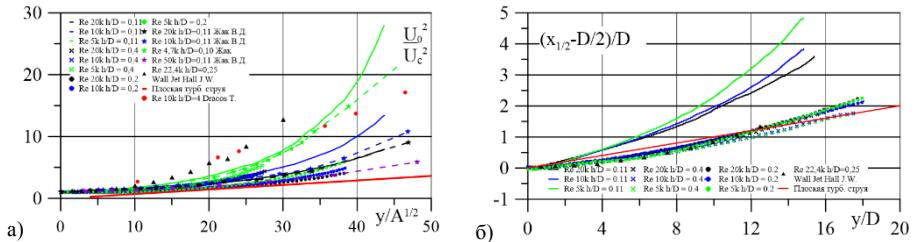


Рисунок 6. а) нормированный профиль обратного квадрата продольной средней скорости от нормированной на корень из площади сечения сопла ($A^{1/2}$) продольной координаты; б) зависимость полуширины струи от безразмерной продольной координаты.

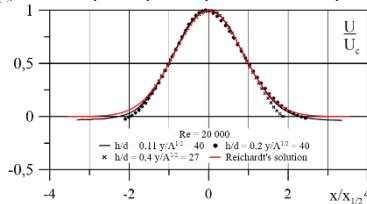


Рисунок 7. Профиль продольной скорости в дальнем поле квазидвумерной турбулентной струи.

Четвертая глава описывает результаты исследования пространственной структуры квазидвумерной турбулентной струи в ближнем, среднем и дальнем поле. Измерения трехмерных трехкомпонентных распределений скорости проводились при помощи Томо-PIV метода в двух конфигурациях расположения измерительных систем с низким и высоким временным разрешением (Рисунок 8 а и б). Исследования проводились в вертикальном щелевом канале (Рисунок 2 б справа) с высотой $h = 4$ мм в трех измерительных областях (Рисунок 8 в) для чисел $Re = 2h \times U_q / \nu$ от 5 000 до 20 000.

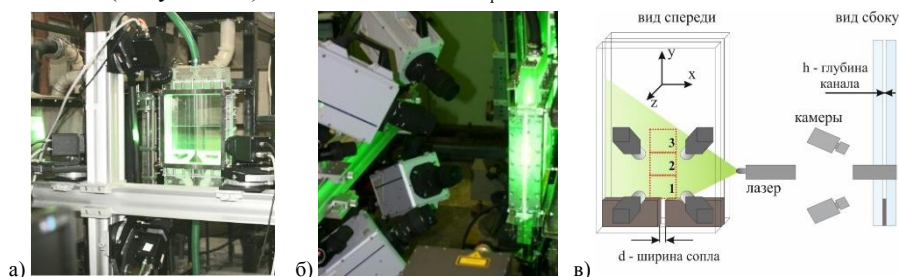


Рисунок 8. Фотографии измерительных Томо-PIV систем: а) низкого временного разрешения б) высокого временного разрешения (10 кГц), в) схема расположения измерительной системы.

На основе 1000 мгновенных трехмерных трехкомпонентных распределений скорости, полученных с низким временным разрешением, были рассчитаны распределения средней скорости. Пространственные распределения скорости в ближнем поле квазидвумерной струи указывают на существенную трехмерность потока, обусловленную наличием вторичных течений. На Рисунке 9 (слева) представлены изоповерхности осредненной продольной компоненты завихренности, характеризующие вторичные течения. Вторичные течения локализуются в слоях смешения квазидвумерной турбулентной струи, влияние которых распространяется на 5-6 калибров вниз по потоку. Для понимания процессов формирования вторичных течений были идентифицированы трехмерные вихревые структуры в потоке с помощью Q – критерия, основанного на положительном значении второго инварианта тензора градиента скорости (Рисунок 9 справа). Формирование вихревых структур Кельвина-Гельмгольца (обозначены желтым цветом) инициирует образование продольных вихревых структур (обозначены красным и синим цветом), в результате образуется вихревая структура с топологией, напоминающей вытянутую подкову – «шпильку».

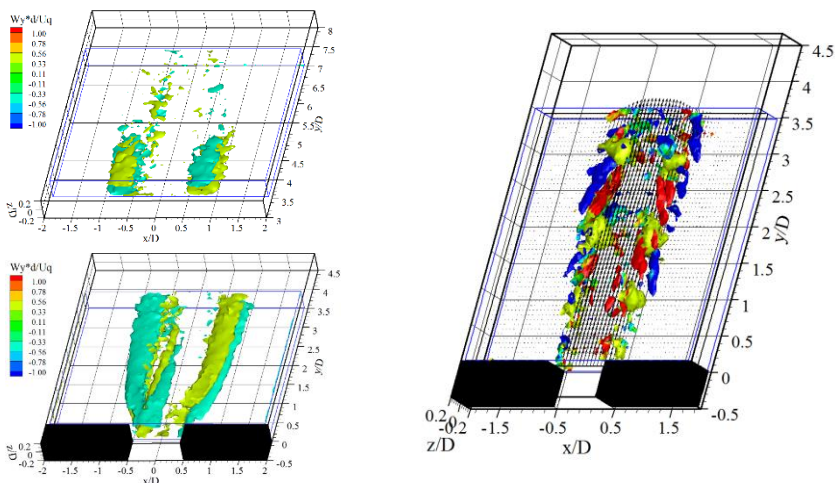


Рисунок 9. Слева: изоповерхности продольной завихренности в ближнем поле струи, справа: мгновенные изоповерхности Q -критерия, рассчитанные по реконструированному на основе POD метода трехмерного трехкомпонентного мгновенного распределения скорости.

Исследование динамики трехмерных вихревых структур проводилось при помощи высокоскоростной Томо-PIV системы (Рисунок 8 б). На основе мгновенных трехмерных трехкомпонентных распределений скорости были рассчитаны мгновенные распределения Q -критерия и три компоненты завихренности. Томо-PIV эксперименты позволили впервые обнаружить продольные вихревые структуры в квазидвумерной турбулентной струе и получить количественные данные о трехмерной структуре и динамике потока. На Рисунке 10 (слева) представлены сдвиговые вихревые структуры, процесс формирования которых носит квазипериодический характер. При достижении сдвиговой вихревой структурой масштаба порядка высоты канала h в ближнем поле квазидвумерной турбулентной струи образуются продольные вихревые структуры.

Данные продольные вихревые структуры представляют собой вихри, вытянутые в направлении потока и имеющие выраженную продольную компоненту завихренности. Их цвет на Рисунке 10 (справа) соответствует значениям нормированной продольной завихренности и указывает направление вращения. Продольные вихревые структуры образуются парами в виде противовращающихся вихревых структур. Анализ последовательных

вихревых структур показал, что процесс формирования продольных вихревых структур отличается от предложенного ранее.

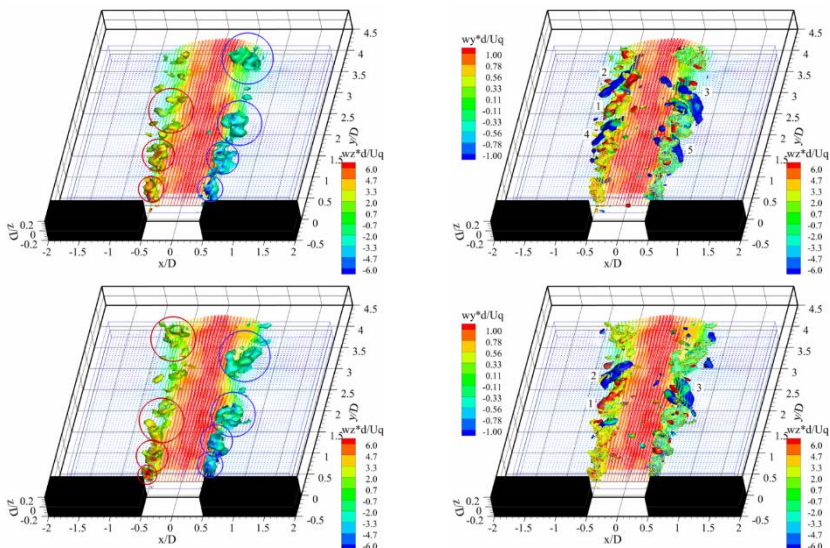


Рисунок 10. Слева: изоповерхности Q -критерия, рассчитанные по продольной и поперечной компоненте мгновенной скорости, справа: изоповерхности Q -критерия, рассчитанные по всем трем компонентам мгновенной скорости. Время между распределениями Q -критерия 1,3 мс.

В дальней области сдвиговые вихревые структуры представляют собой квазидвумерные вихревые структуры, масштаб которых в несколько раз превышает высоту канала h . Вниз по потоку крупномасштабные вихревые структуры выстраиваются в шахматном порядке (Рисунок 11 слева).

Анализ трехмерных трехкомпонентных мгновенных распределений скорости показал наличие в дальнем поле квазидвумерной турбулентной струи продольных областей ненулевых значений нормальной к стенке компоненты скорости. Данные области соответствуют продольным вихревым структурам, идентифицируемым при помощи Q -критерия в виде изоповерхностей, обозначенных синим и красным цветом (Рисунок 11 справа). Продольные вихревые структуры образуются в виде двух противовращающихся вихревых структур, линейных масштаб которых в несколько раз превышает высоту канала h . Наклон продольных вихревых структур относительно основного направления течения зависит от динамики и расположения квазидвумерных вихревых структур.

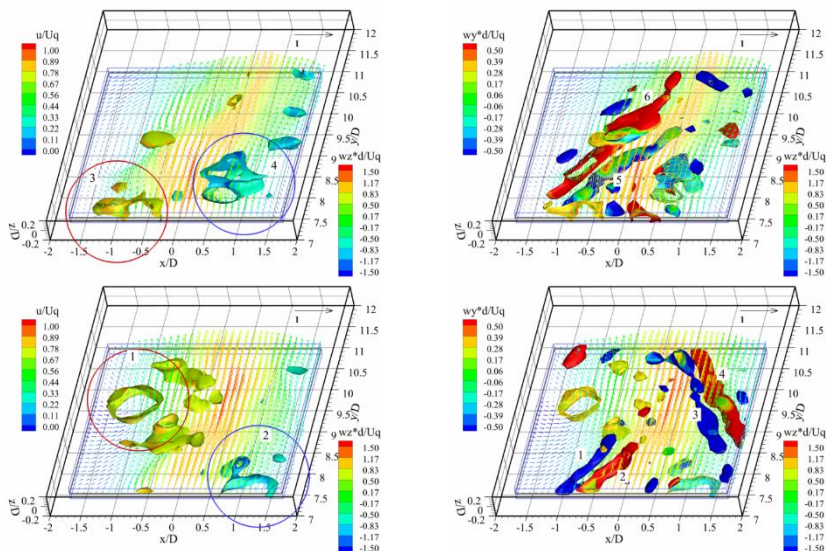


Рисунок 11. Слева: изоповерхности Q -критерия, рассчитанные по продольной и поперечной компонентам мгновенной скорости, справа: изоповерхности Q -критерия, рассчитанные по всем трем компонентам мгновенной скорости. Время между распределениями Q -критерия 10 мс.

Временные спектры пульсаций скорости для ближнего и дальнего поля струи, представлены на Рисунке 12. В ближнем поле формы энергетических спектров для каждой из компонент скорости близки, что указывает на развитие трехмерное турбулентное течение (Рисунок 12 а). Пик в спектре на единой частоте для разных компонент скорости указывает на корреляцию между генерацией их пульсаций, а также на соизмеримый масштаб вихревых структур. Это дополняет утверждение о том, что продольные вихревые структуры являются следствием развития сдвиговых вихревых структур Кельвина-Гельмгольца. В дальнем поле струи спектры значительно расходятся на частотах, соответствующих длинноволновому движению, что является следствием ограничения нормальной к стенке компоненты скорости (Рисунок 12 б). «Безграничность» в горизонтальном направлении приводит к росту масштаба квазидвумерных крупномасштабных вихревых структур.

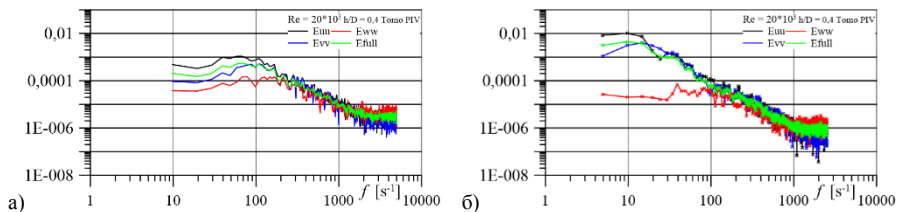


Рисунок 12. Временные спектры пульсаций скорости в ближнем (а) и дальнем (б) поле струи.

Пятая глава описывает результаты исследования пространственной структуры квазидвумерной турбулентного следа за цилиндром в щелевом канале (Рисунок 2 в, справа). Пространственные распределения скорости в ближнем поле квазидвумерного турбулентного следа указывают на существенную трехмерность потока, обусловленную наличием вторичных течений (Рисунок 13). В ближнем поле следа за цилиндром образуются внутренние и внешние вторичные течения, идентифицируемые как два квадрупольных распределения продольной завихренности (Рисунок 13 г).

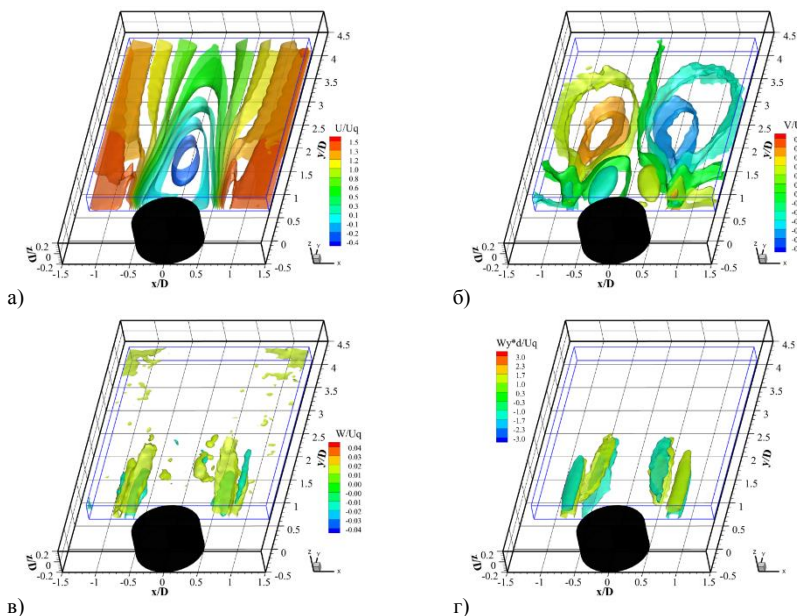


Рисунок 13. Изоповерхности продольной (а), поперечной (б), нормальной к стенке (в) компонент средней скорости и изоповерхности средней продольной завихренности (г). $Re_D = 3\,500$.

Внутренние и внешние вторичные течения имеют разную пространственную топологию, интенсивность, протяженность и направление вращения. Внутренние вторичные течения формируются в результате образования продольно ориентированных участков вблизи сдвиговых вихревых структур вследствие взаимодействия их с ограничивающими стенками канала. Внешние вторичные течения, образующиеся вследствие концевых участков подковообразных вихревых структур, являются более локализованными в пространстве (Рисунок 14 справа).

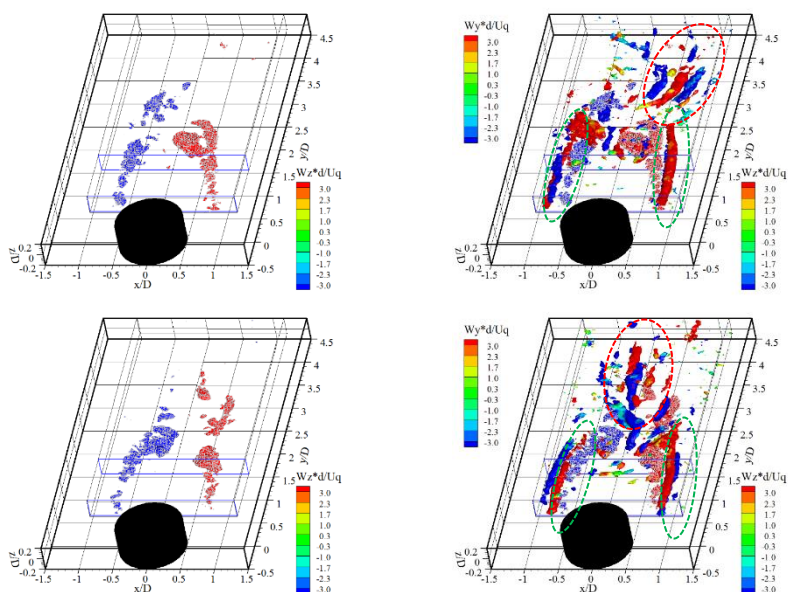


Рисунок 14. Мгновенные распределения безразмерного $Q2D$ критерия (слева) и мгновенные распределения безразмерного Q -критерия (справа). Время между распределениями скорости 72 мс. $Re_D = 2600$.

Томо-PIV эксперименты позволили впервые наблюдать динамику сдвиговых вихревых структур, концевых участков подковообразных вихревых структур, а также обнаружить системы продольных вихревых структур. При помощи Q -критерия в ближнем следе за цилиндром идентифицированы три типа вихревых структур: сдвиговые вихревые структуры (Рисунок 14 слева), концевые участки подковообразных вихревых структур и системы продольных вихревых структур, обозначенные зеленой и красной пунктирными линиями на Рисунке 14 справа. Анализ последовательных 3D

распределений Q-критерия показал, что формирование продольных вихревых структур и их динамика связаны с развитием и перемежающимся движением противовращающихся квазидвумерных крупномасштабных вихревых структур Кармана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С использованием высокоскоростной PLIF визуализации, высокоскоростного PIV метода, в том числе в томографической конфигурации, проведено комплексное экспериментальное исследование структуры течения при распространении турбулентной струи и турбулентного следа за цилиндром в щелевом канале (квазидвумерной турбулентной струи и квазидвумерного следа). Впервые обнаружено явление модуляции амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи. Модуляция обусловлена циклической сменой режимов течения, соответствующих варикозной и синусоидальной моде неустойчивости струи. Показано, что частота меандрирования уменьшается с ростом числа Re и качественно описывается зависимостью $f \sim (y/d)^{-3/2}$ в широком диапазоне исследуемых параметров (чисел Re и отношения глубины канала и ширины сопла h/D).
2. Рассчитанные на основе ансамбля полей скорости, измеренных для квазидвумерной турбулентной струи, временные одномерные энергетические спектры демонстрируют наличие зависимостей, характерных для двумерной турбулентности, - прямого каскада энтропии и обратного каскада энергии, что дает основу для использования соответствующих приближений для описания крупномасштабной структуры подобных течений.
3. Вместе с тем для изученных конфигураций течений продемонстрирована необходимость учета трехмерных эффектов, играющих существенную роль в процессах тепломассопереноса. Показано, что в квазидвумерной турбулентной струе закон затухания осевой скорости и закон расширения струи носят экспоненциальный характер и зависят от h/D и коэффициента трения c_f . Наличие близкорасположенных ограничивающих стенок приводит к тому, что течение в струе не является автомодельным, струя расширяется и затухает быстрее свободных и трехмерных ограниченных турбулентных плоских струй.
4. Проведена апробация методики томографического PIV с высоким временным разрешением для измерения трехмерных трехкомпонентных распределений скорости в ограниченных анизотропных сдвиговых течениях. Измерены пространственные трехкомпонентные распределения мгновенной и

средней скорости в квазидвумерной турбулентной струе и турбулентном следе при обтекании цилиндра в щелевом канале с соотношением $h/D < 1$. Впервые в дальнем поле квазидвумерной турбулентной струи зарегистрированы продольные структуры, с линейным масштабом, на порядки превышающим глубину канала. В ближнем поле струи и ближнем поле следа также зарегистрированы продольные и шпилькообразные структуры соответственно, являющиеся результатом взаимодействия сдвиговых крупномасштабных вихрей Кельвина-Гельмгольца с ограничивающими стенками канала. На основе рассчитанных временных спектров для каждой компоненты пульсаций скорости определены характерные безразмерные частоты распространения квазидвумерных крупномасштабных вихрей и продольных вихревых структур.

5. Экспериментально подтверждено наличие локальных вторичных течений в ближнем поле квазидвумерной турбулентной струи. Показано, что при обтекании ограниченного цилиндра формируются два квадрупольных распределения продольной завихренности, соответствующие внешним и внутренним локальным вторичным течениям. Локальные вторичные течения для струи и обнаруженные впервые внутренние вторичные течения для следа являются следствием образования продольных вихревых структур в ближнем поле струи, либо шпилькообразных структур в ближнем поле следа. Определена область влияния локальных вторичных течений на осредненную структуру квазидвумерной турбулентной струи и следа.

Основное содержание диссертации изложено в следующих рецензируемых работах:

1. (Из перечня ВАК) Бильский А.В., Ложкин В.А., Маркович Д.М., Токарев М.П. Шестаков М.В. Оптимизация и тестирование томографического метода измерения скорости в объеме потока // Теплофизика и аэромеханика. –2011. –Т.18, –№4. – С.1 – 12.
2. (Из перечня ВАК) M.V. Shestakov, D. M. Markovich, M. P. Tokarev, V.M. Dulin, D. Ph. Sikovsky PIV study of large-scale flow organization in slot jets // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2015. – V. 51. – P. 335–352.
3. (Из перечня ВАК) Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М. Применение метода Time-Resolved Tomographic PIV для исследования процессов формирования когерентных вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе // Научная визуализация. – 2015. – Т.7, – № 3. – С. 1 – 8.

4. (Из перечня ВАК) Shestakov M.V., Mullyadzhyanov R.I., Tokarev M.P., Markovich D.M. Modulation of large-scale meandering and three-dimensional flows in turbulent slot jets // Journal of Engineering Thermophysics. – 2016. – V.25, – №2. – P. 159 – 165.
5. (Из перечня ВАК) М.В. Шестаков, Д.М. Маркович Трехмерная структура потока в ближнем следе за цилиндром в щелевом канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2021. – Т. 28, – № 6. – С. 807–812.
6. (Из перечня ВАК) Shestakov M.V., Tokarev M.P., Markovich D.M. 3D structure of flow in the near field of the quasi-two-dimensional turbulent jet // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – V. 899. - P. 062006–1–062006–5.
7. (Из перечня ВАК) Serezhkin A.V., Shestakov M.V., Tokarev M.P. An industrial light-field camera applied for 3D velocity measurements in a slot jet // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1770. – P. 030025–1–030025–5.
8. (Из перечня ВАК) Shestakov M.V., Dulin V.M., Tokarev M.P., Markovich D.M. Dynamics of primary and secondary vortices in a slot jet // 9th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP – 2015, 2015, 2.
9. Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Shestakov M.V. Turbulent structure of quasi-two dimensional slot jet // THMT-05. Turbulence Heat and Mass Transfer 5. ICHMT Digital library online. – 2006. – V.10. –P. 429–432.
10. Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Shestakov M.V. Turbulence measurements in a quasi-two dimensional jet in a slot channel // 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP – 2007. – 2007. – P.1067–1072.
11. Dulin V.M., Markovich D.M., Tokarev M.P., Shestakov M.V. Stereo-PIV measurements of turbulent characteristics in a quasi two-dimensional jet flow // Proceedings of the 5th International Symposium PIV. – 2007.
12. Dulin V.M., Markovich D.M., Shestakov M.V. Stereo PIV measurements of turbulent structure of a quasi-two dimensional jet spreading in a slot channel // Proceedings of the 5th International Conference on Transport Phenomena in Multiphase Systems, HEAT – 2008, – 2008. – V.1. – P. 421 – 426.
13. Ложкин В.А., Маркович Д.М., Шестаков М.В. Исследование квази-двумерной турбулентной струи в щелевом канале // Сборник научных статей. Современная наука – 2010. – № 2 (4). – С. 195 – 200.
14. Ложкин В.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Шестаков М.В. Экспериментальное исследование вторичных течений в квазидвумерной турбулентной струе // Сборник научных статей. Современная наука – 2011. – № 2 (7). – С. 247–253. ISSN 2076-6866.
15. Бильский А.В., Ложкин В.А., Маркович Д.М., Токарев М.П. Шестаков М.В. Применение томографического метода измерения скорости в объеме потока // Материалы XI Международной научно-технической конференции ОМИП Издательский дом МЭИ, Москва, – 2011. – С.1–12.
16. Bilsky A.V., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Shestakov M.V. Tomographic PIV and Planar Time-resolved PIV Measurements in a Turbulent Slot Jet //

Proceedings of the 16th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. – 2012. – P. 1–10.

17. Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М. 3D динамика вихревых структур в квазидвумерной турбулентной струе // Сборник научных статей. Современная наука № 1 (14) – 2014. – С. 146 – 151. ISSN 2076-6866.

18. Shestakov M.V., Markovich D.M., M.P. Tokarev M.P. 3D Flow Dynamics in a Turbulent Slot Jet: Time-resolved Tomographic PIV Measurements. Proceedings of the 17th Int. Symp. On Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. – 2014. – P. 1 – 7.

19. Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М. Визуализация эволюции и взаимодействия вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2015. – №1(15). – С. 211 – 216.

20. Shestakov M.V., Tokarev M.P., Markovich D.M. 3D Dynamics of vortex structures in a quasi two-dimensional jet // Proc. 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP – 10). Paper ID:189 – 2015. – P.1 – 7.

21. Shestakov M.V., Tokarev M.P., Markovich D.M. Visualizing the evolution and interaction of vortices in a quasi two-dimensional jet: Time-Resolved Tomographic PIV measurements // Proceedings of The 13th Asian Symp. on Visualization. – 2015. – P. 1-7.

22. Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М. Применение метода Time – Resolved Tomographic PIV для исследования процессов формирования когерентных вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе // Труды XIII международной научнотехнической конференции «Оптические методы исследования потоков», г. Москва, Россия. – М.: Изд-во НИУ «МЭИ» – 2015. – С. 59 – 68.

23. Palkin E., Mullyadzhzhanov R., Shestakov M., Niceno B., Markovich D, Hanjalic K. Secondary currents and heat transfer in flow around a cylinder mounted in a narrow channel: LES and PIV // THMT-18. Turbulence Heat and Mass Transfer 9. ICHMT Digital library online. – 2018. – P. 255–258.

24. Palkin E., Shestakov M., Mullyadzhzhanov R. Secondary flows and heat transfer in shallow flow around a cylinder: LES, PIV // EPJ Web of Conferences 2019. – V. 196. – P. 00028–1–00028–5.

25. Seredkin A.V., Shestakov M.V., Tokarev M.P. An industrial light field camera applied for 3D velocity measurements in flow past confined cylinder // EPJ Web of Conferences. – 2019.– V. 196. – P. 00056–1–00056–5.

Подписано к печати 2022г. Заказ №
Формат 60х84/16. Объем 1.0 уч.-изд. л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики СО РАН
просп. Ак. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090