



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН Маркович Д.М.

« 22 » декабря 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

В период подготовки диссертации с 2008 по 2021 гг. соискатель Шестаков Максим Владимирович работал в лаборатории физических основ энергетических технологий (в должности инженера-исследователя, с 2014 года – в должности младшего научного сотрудника). В 2005 году окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению «физика». В период с 2005 по 2008 гг. проходил очное обучение в аспирантуре Института теплофизики СО РАН.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы выдана в 2021 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – академик РАН, доктор физико-математических наук, Маркович Дмитрий Маркович, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы

Квазидвумерные сдвиговые течения наиболее часто реализуются в энергетических установках атомной энергетики, геотермальной энергетике, системах охлаждения электроники, энергетических теплообменных аппаратах, а также аппаратах химических технологий. Течение в узких каналах, составных каналах, а также между цилиндрами имеет важное значение при разработке и проектировании теплообменных аппаратов и тепловыделяющих сборок. Это обусловлено тем, что течения в узких каналах характеризуются большими градиентами скорости на стенках при небольших расходах

протекающей жидкости и умеренных перепадах давления, что позволяет использовать их в высокоэффективных и компактных теплообменных устройствах и смесителях. Эффективность работы теплоносителя в таких каналах (съем тепла с поверхности) целиком определяется структурой турбулентности и скоростью движения жидкости в них. Среди наиболее важных из них – это квазидвумерные турбулентные струи и следы, распространяющиеся в узких каналах между двумя ограничивающими поверхностями, на динамику и структуру течения которых существенное влияние оказывают придонное трение на стенке. Главная особенность структуры квазидвумерного течения состоит в сосуществовании крупномасштабных двумерных турбулентных движений, которые определяют перенос на большие расстояния, и трехмерных турбулентных движений масштаба меньше размера канала, которые могут интенсифицировать процессы перемешивания и тепло- и массообмена со стенкой. 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 теплообмена между жидкостью и твердой стенкой.

Квазидвумерные турбулентные сдвиговые течения являются наиболее сложными как для численного, так и для физического моделирования. Сложность заключается в необходимости одновременного разрешения широкого диапазона масштабов, которые относятся к области трехмерной и двумерной турбулентности, реализуемых в квазидвумерном потоке. Таким образом, для эффективного использования квазидвумерных сдвиговых течений в современных высокоэффективных энергетических технологиях необходимы количественные знания о влиянии масштабных эффектов на динамику квазидвумерного сдвигового течения, процессах образования и распада крупномасштабных вихревых структур, а также о взаимосвязи между крупномасштабными, продольными вихревыми структурами и средним течением, которые невозможно получить без детального экспериментального исследования пространственной трехмерной структуры потока с высоким пространственным и временным разрешением.

Целью 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**:

1. 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;
2. 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;

3. 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;
4. 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.

Личный вклад автора:

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.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных экспериментальных 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.

Научная новизна:

1. 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.
2. 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.

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

4. 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.

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

Научная 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 позволяют 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.

Список работ, опубликованных по теме диссертации.

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.

Статьи в журналах, включенных в Перечень ВАК:

1. 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. 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. 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. Shestakov M.V., Mullyadzhanov 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. 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. 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. Seredkin 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. 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.

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.

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности.

Диссертация Шестакова М.В. посвящена экспериментальному исследованию закономерностей формирования, развития и взаимодействия трехмерных вихревых структур, образующихся в квазидвумерных сдвиговых турбулентных течениях, в частности, струях и следах в щелевых каналах и соответствует паспорту специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

Решение о рекомендации работы к защите:

Диссертация «Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах» Шестакова Максима Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством академика РАН, д.ф.-м.н. Алексеенко Сергея Владимировича. Присутствовали на заседании 48 человек, из них 22 доктора наук, 18 кандидатов наук.

Результаты открытого голосования по вопросу о принятии заключения по диссертации Шестакова М.В.: за – 48 человек, против – 0, воздержались – 0. Протокол №4 от «22» декабря 2021 г.

Председатель семинара
академик РАН, д.ф.-м.н.



С.В. Алексеенко

Секретарь семинара
к.т.н., с.н.с. ИТ СО РАН



И.К. Кабардин