

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ГИДРОДИНАМИКИ

им. М.А. Лаврентьева

СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

(ИГИЛ СО РАН)

Академика Лаврентьева проспект, 15, Новосибирск, 630090

Тел./факс: (383) 333-16-12. E-mail: igil@hydro.nsc.ru

ОКПО 03533978; ОГРН 1025403648600;

ИНН/КПП 5408100064/540801001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор федерального
государственного бюджетного
учреждения науки «Институт
гидродинамики имени
М.А. Лаврентьева Сибирского
отделения Российской академии
наук»

д.ф.м.н.

Ерманюк Е.В.

«14 февраля» 2022 г.

14.02.2022 № 15320—

На № _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева Сибирского отделения
Российской академии наук»
на диссертационную работу Шестакова Максима Владимировича
«Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных
турбулентных струй и следов в щелевых каналах»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Шестакова М.В. посвящена исследованию структуры турбулентных течений в щелевых каналах. Течения, в которых один пространственных масштаб (глубина) мал по сравнению с двумя другими, часто встречаются как в геофизических, так и в технических приложениях. В струйных течениях и следах в подобных системах при определенных сочетаниях параметров наблюдаются эффекты роста крупномасштабных когерентных структур, меандрирования, длиннопериодной вариации параметров и т.д., которые существенным образом влияют на ключевые технические характеристики, представляющие интерес в приложениях. Турбулентные потоки в щелевых каналах демонстрируют ряд свойств, характерных как для двумерной, так и для трехмерной турбулентности, вследствие чего они представляют большой интерес для фундаментальных исследований. Экспериментальное исследование таких потоков представляет большую трудность в связи с необходимостью обеспечения высокого разрешения по трем пространственным координатам и времени при низком отношении шума к сигналу, что необходимо для применения современных методов пост-процессинга. Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, **актуальна** и имеет большую значимость в приложениях.

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа Шестакова М.В. характеризуется полнотой и завершенностью. Текст диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации и списка использованной литературы. Диссертация изложена на 216 страницах, содержит 112 рисунков, 5 таблиц, а также библиографический список, включающий 203 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава состоит из двух разделов, первый из которых посвящен обзору экспериментальных и численных работ по исследованию свободных, пристенных, ограниченных и квазидвумерных турбулентных струй. Во втором разделе приведен обзор работ, в которых исследованы свободные, пристенные, и квазидвумерные турбулентные следы, возникающие при обтекании цилиндров. Обзор хорошо проиллюстрирован, в нем описаны основные особенности изучаемых течений, механизмы неустойчивости и механизмы формирования крупномасштабных когерентных структур. На основании выполненного обзора сделаны выводы о необходимости проведения дальнейших экспериментальных исследований с помощью современных полевых бесконтактных методов оптических измерений характеристик жидких потоков.

Во **второй главе** описаны методы измерений и экспериментальные стенды. Подробно описаны двумерный PIV и планарный LIF методы. Особое внимание уделено описанию Томо-PIV метода, т.к. в представленном исследовании этот метод явился основным. Следует отметить высокую тщательность описания методики измерений, рационального выбора камер и их расположения, осветительной аппаратуры. Подробно описаны процедуры калибровки, источники погрешности, критерии оценки качества полученной информации, а также параметры настройки системы, обеспечивающие достижение оптимального качества сигнала. К числу несомненных методических достижений следует отнести возможность измерения компоненты скорости по направлению вдоль зазора между поверхностями, формирующими плоскую ячейку типа Хеле-Шоу.

В **третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования, проведенного с помощью планарных версий PIV и LIF методов при высоком временном разрешении. Подробно изучена динамика крупномасштабных вихревых структур, формирующихся в результате истечения турбулентной струи в вертикальный щелевой канал. Эксперименты проводились в широком диапазоне чисел Рейнольдса (от 5000 до 20000) для нескольких значений высоты канала и ширины сопла. Были впервые зарегистрированы продольные структуры, имеющие линейный масштаб, на порядки превышающий глубину канала. Обнаружено явление модуляции амплитуды меандрирования квазидвумерной турбулентной струи, показано, что это явление связано с чередованием варикозной и синусоидальной мод неустойчивости струи. Выполнен расчет одномерных временных спектров пульсаций скорости при различных числах Рейнольдса и для различных положений вниз по потоку от сопла.

В **четвертой главе** описаны результаты исследования пространственной структуры квазидвумерной турбулентной струи в ближнем, среднем и дальнем поле. Измерения выполнены с помощью Томо-PIV на системах с низким и высоким временным разрешением в диапазоне чисел Рейнольдса от 5 000 до 20 000. Для определения механизма формирования вторичных течений использовалась идентификация вихревых структур с помощью Q – критерия.

В **пятой главе** представлены результаты исследования пространственной структуры турбулентного следа за цилиндром в щелевом канале. Показано, что обтекание цилиндра является существенно трехмерным. При этом формируются вторичные течения. В ближнем поле следа за цилиндром образуются внутренние и внешние вторичные течения, идентифицируемые как два квадрупольных распределения продольной завихренности. Для анализа структуры потока использован Q-критерий. Приведены измерения основных характеристик потока в следе.

Автором диссертации получены следующие **новые результаты**:

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. 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. Получены данные о динамике трехмерной мгновенной вихревой структуры квазидвумерной струи и следа. Экспериментально обнаружены продольные вихревые структуры в течении квазидвумерной турбулентной струи и следа.

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 работы. Получены новые экспериментальные данные о трехмерной пространственной структуре турбулентных сдвиговых течений в щелевом канале при высоком пространственном и временном разрешении. Эти данные в сочетании с примененными автором современными методами пост-процессинга дают ясное представление о процессах формирования и взаимодействия когерентных вихревых структур и вторичных течений в потоке. На основе полученных данных могут быть разработаны эффективные методы управления смешением и тепломассопереносом, а также может быть проведена верификация расчетных методов.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных и апробированных методик проведения экспериментального исследования и последующей обработки результатов. Проведен всесторонний анализ возможных погрешностей измерений, а также выполнена настройка измерительной системы для обеспечения оптимального качества получаемых данных. Использованы современные бесконтактные оптические методы, не вносящие возмущений в динамику изучаемых систем. Проведено сравнение экспериментальных результатов с данными других авторов.

Замечания

1. В примерах «квазидвумерных» геофизических течений следует соблюдать определенную осторожность, так как на поздних стадиях эволюции возмущений для *стратифицированных течений* характерна ситуация 3D-2C, т.е. в каждой плоскости формируется течение, для описания которого на практике достаточно двух компонент скорости (2C), но сами течения в разных горизонтальных плоскостях различны, т.е. образуют 3D совокупность. Для течений *во вращающейся жидкости* характерна ситуация 2D-3C, то есть течения в разных горизонтальных плоскостях приблизительно инвариантны при изменении вертикальной координаты вдоль оси вращения (в этом смысле они соответствуют 2D), но при этом течение в конкретной горизонтальной плоскости может иметь вертикальные компоненты скорости, которыми нельзя пренебречь (в этом смысле течение соответствует 3D).
2. При обсуждении одномерных нормированных (частотных) спектров, например, показанных на рис. 3.3.6., можно было бы для общности (т.к. по тексту упоминаются волновые числа) упомянуть гипотезу Тейлора и продолжающуюся в литературе дискуссию о возможностях ее модификации (см., напр., [Del Alamo & Jimenez, JFM 2009, V. 640. P. 5–26]). Также для общности при обсуждении обратного каскада энергии

можно было бы упомянуть методы, используемые при исследовании этого вопроса вычислителями, например, [Hrebtov, Ilyushin & Krasinsky, Phys. Rev. E 81, 016315].

3. В верхнем ряду графиков, представленных на рис. 3.3.24, очень мелкие подписи.

Заключение

Диссертация Шестакова М.В. является законченной научно-квалификационной работой в области экспериментального исследования турбулентных течений в щелевых каналах, соответствующей специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Работа написана ясным научным языком и хорошо проиллюстрирована. Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 25 работах (8 из них из списка ВАК), а также представлены на многочисленных авторитетных конференциях российского и международного уровня.

Диссертационная работа «Экспериментальное исследование пространственной структуры квазидвумерных турбулентных струй и следов в щелевых каналах» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Шестаков Максим Владимирович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научного семинара «Прикладная гидродинамика» в Институте гидродинамики имени М.А. Лаврентьева СО РАН, протокол № 1 от 09.02.2022 г.

Главный научный сотрудник
Лаборатории прикладной и вычислительной гидродинамики
доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН



Пухначев Владислав Васильевич

Главный научный сотрудник
Лаборатории дифференциальных уравнений
доктор физико-математических наук



Чесноков Александр Александрович

630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15
тел.: +7(383) 333-18-19, e-mail: pukhnachev@gmail.com
тел.: +7 (383) 333-20-13, e-mail: chesnokov@hydro.nsc.ru