УДК 532.542.4, 532.556.2, 532.574.7

3D ДИНАМИКА ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В КВАЗИ-ДВУМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М.

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

Гранты РНФ № 14-19-01685

АННОТАЦИЯ

В работе экспериментально исследована 3D динамика вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе. Для измерения мгновенных трехкомпонентных распределений скорости в объеме потока использовалась высокоскоростная томографическая система (Time-resolved Tomographic PIV) с частотой съемки 10 кГц. Обнаружено, что в потоке квази-двумерной турбулентной струи формируются два вида когерентных вихревых структур: крупномасштабные квази-двумерные вихревые структуры, которые являются следствием развития вихрей Кельвина – Гемгольца, и вторичные продольные вихревые структуры, которые образуются вследствие взаимодействия вихрей Кельвина – Гемгольца со стенками канала.

ВВЕДЕНИЕ

Ограниченные турбулентные струйные течения широко представлены в различных технических приложениях. В работе экспериментально исследуется вихревая структура квази-двумерной турбулентной струи, распространяющейся в канале, образованном двумя близко расположенными плоскопараллельными стенками. Интерес к исследованию турбулентных квази-двумерных струйных течений был связан с возможностью моделирования свойств двумерной турбулентности. В силу ограничения потока по одному из направлений предполагалось, что движение в этом направлении имеет второстепенное значение и играет незначительную роль в крупномасштабной динамике потока, следовательно, течение может рассматриваться как квази-двумерное. Действительно, ограничение потока по одному из направлений приводит к формированию течения, в котором реализуются свойства квази-двумерной турбулентности. В первую очередь это формирование и рост крупномасштабных квази-двумерных вихревых структур. В связи с этим все работы, встречающиеся в литературе, посвящены исследованию свойств квази-двумерной турбулентности в сдвиговых течениях, в частности крупномасштабным вихревым структурам [1-5, 10, 11]. Впервые свойства квази-двумерной турбулентной струи были описаны в работах [4,5]. Авторы работы исследовали распространение плоской турбулентной струи в узком канале, образованном двумя плоскопараллельными пластинами, расположенными на малом расстоянии h друг от друга. В работе было показано, что струя начинает меандрировать, т.е периодически отклоняться от своей оси, при этом в потоке формируются крупномасштабные вихревые структуры, масштаб которых на порядок превышает расстояние между пластинами h. Используя методы анализа линейной неустойчивости, авторы работы [6] показали, что меандрирование струи является следствием развития синусоидальной неустойчивости, а развитие и рост крупномасштабных вихревых структур есть следствие обратного каскада энергии по спектру, характерного для двумерной турбулентности.

Однако в силу малой, но конечной высоты канала, течение в ближней области квази-двумерной турбулентной струи является трехмерным. Об этом свидетельствуют интенсивные вторичные течения, формирующиеся в слоях смешения струи [7,8]. Данные течения свидетельствуют о существенном влиянии движения

вдоль направления, которое является ограниченным стенками канала. В работе [9] с помощью TomoPIV метода было показано, что данные вторичные структуры являются следствием образования продольных вихревых структур. Однако не удалось определить механизм формирования продольных вихревых структур вследствие низкого пространственного и временного разрешения. Продольные вторичные вихревые структуры были обнаружены при численном и экспериментальном моделировании в дальней области сдвиговых открытых течений [11]. Тем самым возникает ряд вопросов и предположений, связанных с механизмом образования вторичных продольных вихревых структур, их существованием и влиянием на формирование крупномасштабных вихревых структур в дальней области струи, которые нуждаются в дополнительном исследовании. Кроме того, эффекты, связанные с трехмерностью, и их роль в развитии квазидвумерного течения на сегодняшний день являются мало изученными.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальный стенд представлял собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из бака, насоса, расходомера и рабочего участка (рис.1). Рабочим участком являлся узкий канал, образованный двумя пластинами из оргстекла (размером 307 на 270 мм^2 и толщиной 24 мм) расположенными на расстоянии $h = 4$ мм друг от друга. Струя формировалась при помощи двух плоских вставок, которые образовывали прямоугольный канал: длиной 70 мм, высотой 4 мм и шириной 4 мм и 10 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Температура жидкости поддерживалась постоянной 26±0,5°C. Исследования проводились для турбулентного режима течения. Число Рейнольдса, построенное по гидродинамическому диаметру w и среднерасходной скорости U_0 $\mathrm{Re}=U_0 w/\nu$, равнялось 20 000.

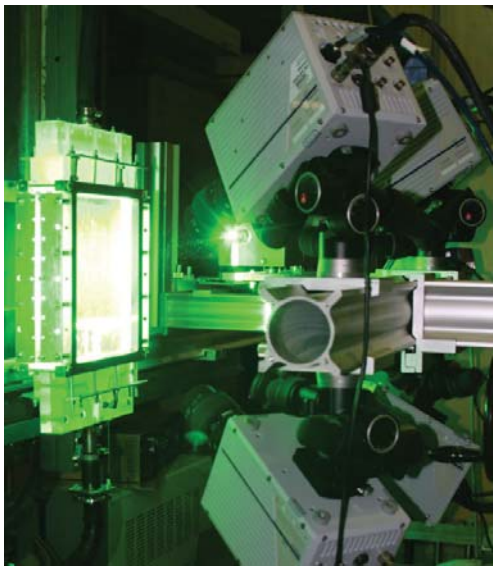

Рис.1 Рабочий участок.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для измерения мгновенных трехкомпонентных распределений скорости в объеме потока использовалась высокоскоростная измерительная система «ПОЛИС», состоящая из высокоскоростного сдвоенного импульсного лазера Photonix DM-532-DH-150 (15 мДж в импульсе длительностью 100 нс и частотой 15 кГц), четырех высокоскоростных CMOS камер Photron FASTCAM SA5 (1024×1024 пикс, 12 бит и частотой съемки 7 кГц) и синхронизатора Berkeley Nucleonics BNC 575. Схема расположения измерительной системы представлена на (рис. 2). Толщина лазерного ножа составляла 4 мм.

В оптической системе применялись объективы SIGMA AF f/2.8 EX DG MACRO с фокусным расстоянием 105 mm.

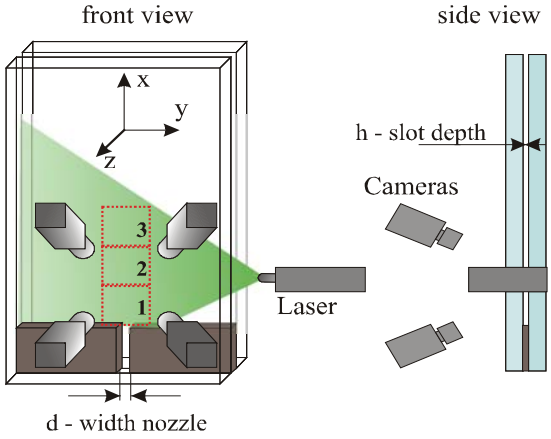

Рис.2 Схема измерительной системы TR-TomoPIV.

Поток засевался полиамидными трассерами диаметром 50 мкм. Для калибровки оптической системы использовалась плоская калибровочная мишень Edmund Optics 50×50 mm^2 с опорными точками-окружностями на декартовой сетке с шагом 1 мм. При калибровке камер использовалась координатная система, позволяющая с точностью 10 мкм перемещать измерительную систему относительно установленной внутри рабочего канала мишени. Для коррекции Шейпфлюга на камеры устанавливались специально разработанные с использованием 3D печати адаптеры. Камеры были расположены в углах квадрата с углом обзора 33 градуса к вертикальной и горизонтальной плоскости. Для увеличения пространственного разрешения измерения проводились в трех областях.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Обработка данных осуществлялась посредством программного обеспечения ActualFlow. Схематичное представление алгоритма, используемого для получения поля скоростей в измерительном объеме потока, показано на рис. 3. Метод состоит из трех шагов: калибровка оптической системы, томографическая реконструкция и корреляционная обработка восстановленных объемных изображений частиц. Калибровка оптической системы состоит из геометрической калибровки всех камер, использующихся для регистрации области потока. Дополнительно для уточнения моделей камер применялся метод самокалибровки по зарегистрированным экспериментальным изображениям частиц [12]. Конечная средняя ошибка после самокалибровки составила меньше 0,05 пикс. Основным шагом получения поля скорости в методе Tomo PIV является восстановление трехмерного распределения интенсивности алгоритмом итерационной алгебраической реконструкции. Для томографической реконструкции были использованы SMART и MENT алгоритмы [13].

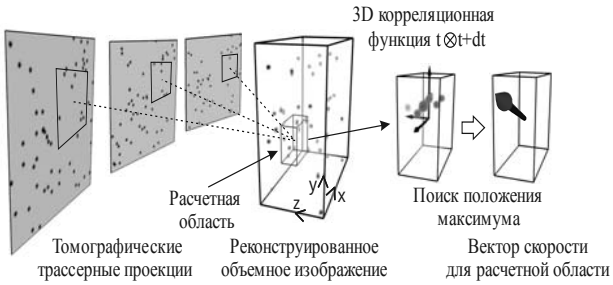

Рис.3 Схема алгоритма оценки поля скорости в методе Tomo PIV.

Восстановленный 3D объем был равен 1024 × 1024 × 128 вокселей. Физический размер воксела был равен 0,065 × 0,065 × 0,065 $мм^3$. Корреляционная обработка проводилась с использованием итеративного многосеточного алгоритма с непрерывным смещением расчетной ячейки. Было использовано четыре итерации с перекрытием расчетной ячейки в 75%, окончательное разрешение составило 16 × 32 × 16 вокселей. Физическое разрешение на один вектор скорости равнялось 1 × 2 × 1 $мм^3$

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 4 представлены вторичные течения в виде изоповерхности продольной завихренности, рассчитанной по осредненному полю скорости.

Вторичные течения формируются на начальном участке квазидвумерной турбулентной струи справа и слева от ядра струи (изоповерхность желтого цвета). Вторичные течения являются следствием осреднения направленных по потоку вихревых структур.

На рисунке 5 представлено распределение значений Q^{3D} – критерия, рассчитанного по мгновенному трехкомпонентному распределению скорости в ближней области струи. Изоповерхности Q^{3D} – критерия раскрашены в положительные (желтый) и отрицательные (синий) значения продольной завихренности. Данные распределения указывают на наличие в потоке продольных вихревых структур. На рисунке отчетливо видно, что продольные вихревые структуры образуются вблизи когерентных вихревых структур, сформированных вследствие сдвиговой неустойчивости Кельвина – Гемгольца.

На рисунке 6 представлены изоповерхности продольной завихренности (красный и синий цвет), изоповерхность Q^{2D} – критерия, рассчитанного по двум компонентам скорости (жел-

тый цвет), а также в двух сечениях показано векторное поле скорости v_x, v_z и распределение значений v_z. Распределения Q^{2D} – критерия построены для идентификации квази-двумерных вихревых структур Кельвина – Гельмгольца.

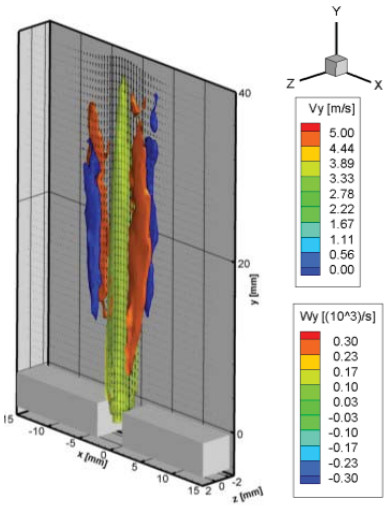

Рис.4 Вторичные потоки на начальном участке квазидвумерной струи.

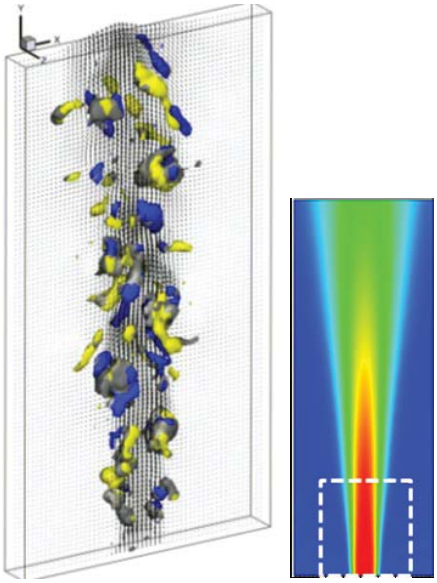

Рис.5 Распределение значений Q – критерия, рассчитанные по мгновенному трехкомпонентному распределению скорости. Продольные вихревые структуры в ближнем поле струи.

При прохождении квазидвумерной структуры Кельвина – Гельмгольца (рис. 6 а) вблизи стенок образуется отрыв потока вследствие локального понижения давления, обусловленного прохождением вихревой структуры. Отрыв потока вблизи стенки приводит к образованию двух продольных вихревых структур. Данные структуры показаны на рис. 6 б) в виде изоповерхностей продольной завихренности красным и синим цветом.

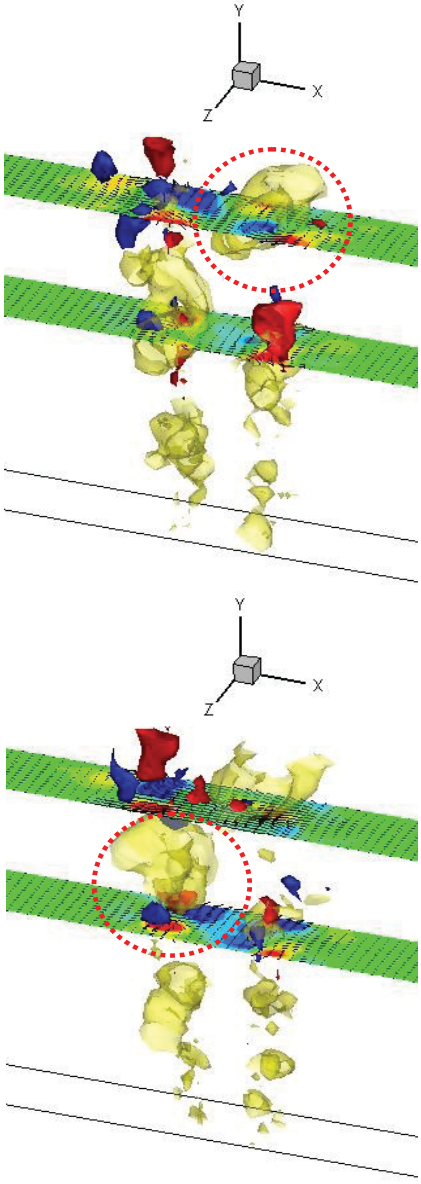

Рис.6 Формирование продольных вторичных вихревых структур в ближнем поле струи, а) формирование отрыва и б) образование продольных вихревых структур.

Рисунок 7 демонстрирует, что продольные вторичные вихревые структуры существуют и

в дальней области струи, при этом увеличивается их линейный масштаб. Анализ последовательных мгновенных распределений Q^{3D} – критерия указывает, что продольные вихревые структуры, так же как и крупномасштабные квази-двумерные вихревые структуры, являются когерентными структурами.

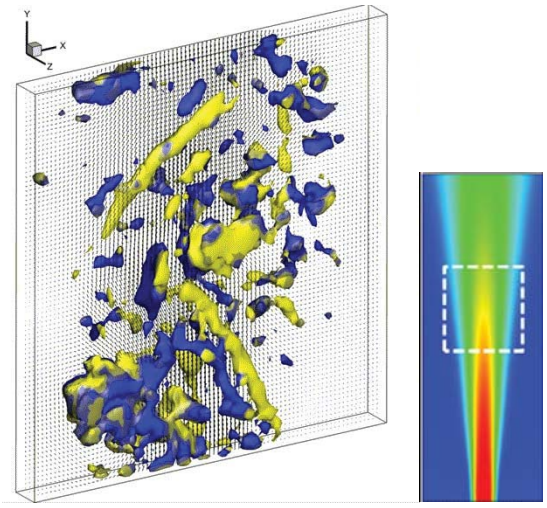

Рис.7 Распределение значений Q – критерия, рассчитанные по мгновенному трехкомпонентному распределению скорости. Продольные вихревые структуры в дальнем поле струи.

На рисунке 8 представлены одномерные спектры пульсаций скорости для каждой компоненты отдельно. В спектре можно выделить участок с наклоном «-3», характерный для квазидвумерной турбулентности и указывающий на существование обратного каскада энергии по спектру. На рисунке 8 отчетливо просматривается максимум в спектре v_z –компоненты скорости, который совпадает с максимумом v_y – (продольной) компонентой скорости. Данный факт указывает на взаимосвязь между продольной и перпендикулярной стенке компонентами скорости, которые, соответственно, характеризуют когерентные крупномасштабные движения (квазидвумерные вихревые структуры) и когерентные мелкомасштабные движения (продольные вторичные вихревые структуры).

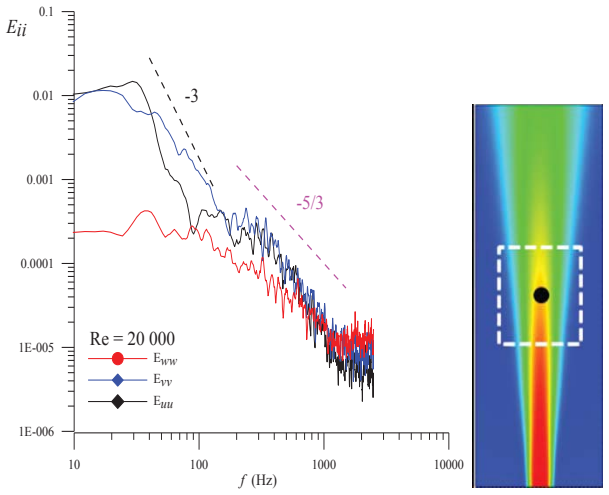

Рис.8 Одномерные спектры пульсаций скорости в дальней области струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые исследована 3D динамика вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе с помощью высокоскоростного томографического метода PIV (TR-TomoPIV). При течении квази-двумерной струи в ближней области струи в слоях смешения формируются вихри Кельвина-Гемгольца (К-Г.), которые развиваются в крупномасштабные квази-двумерные вихревые структуры. Вихревые структуры К-Г. образуются поочередно справа и слева от оси струи, что в последствии приводит к меандрированию струи. Показано, что в ближней области струи вихри К-Г. при взаимодействии со стенкой формируют вторичные продольные структуры. Анализ последовательных мгновенных распределений Q^{3D} – критерия указывает, что продольные вихревые структуры, так же как и крупномасштабные квази-двумерные вихревые структуры, являются когерентными структурами. Показано, что вторичные продольные вихревые структуры развиваются вниз по потоку, при этом увеличивается их линейный размер. Вторичные продольные вихревые структуры могут оказать существенное влияние на процессы связанные с перемешиванием и вовлечением окружающей жидкости. Временные спектры, построенные для каждой из компонент скорости, указывают на взаимосвязь между частотой меандрирования и вторичными продольными вихревыми структурами в дальней области струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.H. Jirka. Large scale flow structures and mixing processes in shallow flows. Journal of Hydraulic Research, 39(6):567-573, 2001.
2. B.C. van Prooijen. Shallow Mixing Layers. PhD thesis, Delft University of Technology, 2004
3. Rowland JC, Stacey MT, Dietrich WE (2009) Turbulent characteristics of a shallow wall-bounded plane jet: experimental implications for river mouth hydrodynamics. J Fluid Mech 627:423–449.
4. Giger M, Dracos T, Jirka GH (1991) Entrainment and mixing in planeturbulent jets in shallow water. J Hydraul Res 29:615–642
5. Dracos T, Giger M, Jirka GH (1992) Plane turbulent jets in a bounded fluid layer. J Fluid Mech 241:587–614
6. Chen D, Jirka GH (1998) Linear stability analysis of turbulent mixing layers and jets in shallow water layers. J Hydraul Res 36:815–830
7. Foss JF, Jones JB (1968) Secondary flow effects in a bounded rectangular jet. J Basic Eng 90:241–248.
8. Holdeman JD, Foss JF (1975) The initiation, development, and decay of the secondary flow in a bounded jet. J Fluids Eng 97:342–352.
9. Bilsky A.V., Markovich D.M., Shestakov M.V., Tokarev M.P. Tomographic PIV and planar Time-resolved PIV measurements in a turbulent slot jet // Proc. of the 16th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, pp 09–12 July, 2012
10. Landel JR, Caulfield CP, Woods AW (2012) Meandering due to large eddies and the statistically self-similar dynamics of quasi-twodimensional jets. J Fluid Mech 692:347–368.
11. Harmen TALSTRA Large-scale turbulence structures in shallow separating flows. Ph.D. thesis. Delft University of Technology 2011
12. Atkinson C., Soria J. An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // Exp. Fluids. – 2009. – Vol. 47. – P. 553-568.
13. Bilsky A.V., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P. A maximum entropy reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // Meas. Sci. Technol. 2013. 24. 045301

© Шестаков М.В., Токарев М.П., Маркович Д.М.