УДК 532.542.4, 532.556.2, 532.574.7

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭВОЛЮЦИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В КВАЗИ-ДВУМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

Шестаков М.В.[1], Токарев М.П.[1], Маркович Д.М.[1,2]

[1]Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН
[2]Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

Работа поддержана грантом РНФ № 14-19-01685

АННОТАЦИЯ

В докладе представлены результаты применения метода Tomographic PIV высокого временного разрешения для исследования процессов формирования и развития когерентных вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе. Получены трехкомпонентные трехмерные распределения скорости в объеме потока для ближнего и дальнего поля квази-двумерной турбулентной струи. На основании рассчитанных распределений Q критерия проанализированы процессы образования и развития вихревых структур в потоке. Показано, что в потоке квази-двумерной турбулентной струи формируются два типа когерентных вихревых структур: вторичные продольные вихревые структуры и квази-двумерные вихревые структуры, образующиеся вследствие развития сдвиговой неустойчивости Кельвина - Гельмгольца.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к исследованию квази-двумерных турбулентных ограниченных струйных течений обусловлен широким распространением данного течения в технологических и природных процессах, в частности из-за наличия крупномасштабных когерентных квази-двумерных вихревых структур. Крупномасштабные когерентные структуры играют важную роль в процессах перемешивания и переноса массы (например, загрязняющих веществ и отложений), импульса и энергии в мелководных потоках, включая устья рек, озера, каналы и океаны. Квази-двумерное турбулентное течение является крайне сложным для численного и экспериментального моделирования. Сложность обусловлена наличием и взаимодействием двух сильно различных масштабов турбулентности: с одной стороны это трехмерные мелкомасштабные турбулентные движения масштаба h (толщина слоя жидкости), с другой стороны, крупномасштабные квази-двумерные турбулентные движения, обусловленные развитием сдвиговой неустойчивости в горизонтальном направлении.

Одной из первых работ, посвященных исследованию крупномасштабных квази-двумерных вихревых структур, является работа [5]. В работе исследовалась структура течения квази-двумерной струи, распространяющейся в узкий канал в широком диапазоне глубины канала h. Согласно работе [5] выделяют две области течения: ближнее поле струи (область трехмерного течения), в котором существенное влияние оказывают вторичные течения, и дальнее поле струи (область квази-двумерного течения), которое характеризуется наличием крупномасштабных квази-двумерных вихревых структур и проявлением эффекта меандрирования. В настоящее время исследования свойств крупномасштабных квази-двумерных вихревых структур и эффект меандрирования продолжаются, о чем свидетельствует ряд работ по численному и экспериментальному моделированию [4, 9, 10, 14].

Исторически сложилось, что исследования ближнего и дальнего поля квази-двумерной ограниченной струи проводились независимо и имели различные цели. Изначально интерес к исследованию ограниченных струйных течений был обусловлен развитием струйных логических элементов для военных и космических целей [6, 7, 11, 12, 13]. Эти работы касались исследования влияния ограничивающих стенок на структуру течения в ближнем поле струи и были направлены на развитие методов управления струйным потоком. В работах было показано, что в течении струи, ограниченной сверху и снизу двумя пластинами, в слое смешения образуются вторичные течения. В работе [6, 7] была предложена модель формирования вторичных течений на основе переориентации вихревых нитей. Турбулентные характе-

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

ристики вторичных течений в ограниченных струях с различными соотношениями сопла были исследованы в работах [12, 13]. В работе [13] представлена пространственная вихревая структура, полученная с помощью визуализации. В работе [5] также частично исследовано ближнее поле квази-двумерной струи и качественно определена область существования вторичных течений. Для подтверждения гипотезы работ [6, 7], формирования вторичных течений в работе [2] с помощью TomoPIV метода были проведены измерения всех трех компонент скорости в объеме потока ближнего поля квази-двумерной струи. Анализируя реконструированные по 10 наиболее вероятным пространственным конфигурациям объемных мгновенных распределений трех компонент скорости, полученных с помощью POD разложения, удалось зафиксировать продольные вихревые структуры, которые являются ответственными за формирование вторичных течений. Оказалось, что существуют различия между структурой вторичных течений квази-двумерной струи и структурой вторичных течений ограниченных струй, исследованных в работах [6, 7]. Различие состоит в противоположных направлениях вращения вторичных течений, полученных в работе [7] и [2]. Низкое пространственное и временное разрешение в работе [2] не позволили объяснить эти различия и ответить на ряд вопросов, касающихся образования и развития когерентных вихревых структур в квази-двумерной турбулентной струе.

Наша работа является логическим продолжением работы [2] и направлена на исследование процессов формирования и развития вихревых структур, а также их взаимодействия между собой и стенкой.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Иллюстрация принципов работы алгоритма, используемого для получения поля скоростей в измерительном объеме потока, показана на рис. 1.

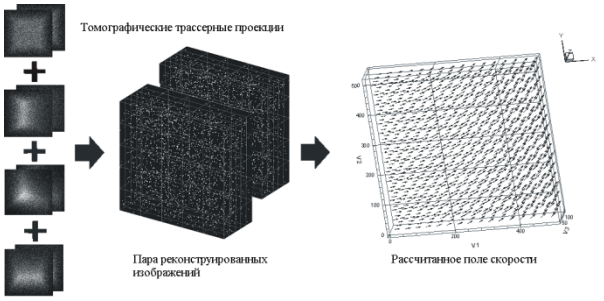

Рис. 1 Иллюстрация принципов работы алгоритма оценки поля скорости в методе Tomo PIV

Описание метода Tomo PIV приведено в работе [15], 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 применяется метод самокалибровки по зарегистрированным экспериментальным изображениям частиц [18]. Основным шагом получения поля скорости в методе Tomo PIV является восстановление трехмерного распределения интенсивности частиц алгоритмом итерационной алгебраической реконструкции. Для томографической реконструкции используются алгоритмы SMART и MENT [3].

Заключительным шагом Tomo PIV алгоритма является корреляционный анализ полученных пар объемных изображений частиц для оценки поля скорости (см. рис. 1). Принцип кросскорреляционного алгоритма, применяемого для томографических измерений, не отличается от алгоритма, используемого для плоскостных измерений, при этом добавляется оценка третьей компоненты скорости по глубине области измерения. Более подробное описание метода и его тестирование приведено в работе [1].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Фотография экспериментальной установки и схема измерительной системы представлена на рис. 2. Экспериментальная установка представляет собой гидродинамический контур с баком постоянного уровня, насосом, расходомером и рабочим участком. Рабочий участок представляет собой узкий прямоугольный канал размером 307x270 mm^2, образованный двумя плоскопараллельными пластинами из оргстекла, расположенными на расстоянии 4 мм друг от друга. Сопло формировалось двумя прямоугольными вставками, установленными в канал. Ширина сопла равнялась 10 мм. Число Рейнольдса рассчитывалось как $Re = h_d U_0/\nu = 20\,000$, где U_0 средне расходная скорость, а h_d гидравлический диаметр сопла. Измерительная система состояла из высокоскоростного сдвоенного Nd: YAG лазера (Photonix DM-532-150 с энергией в импульсе 15 мДж при частоте работы 15 кГц), четырех высокоскоростных CMOS камер (Photron FASTCAM SA5 с разрешением 1024×1024 пикс, 12 бит с частотой съемки 7 кГц) и генератора импульсов Berkeley Nucleonics BNC 575.

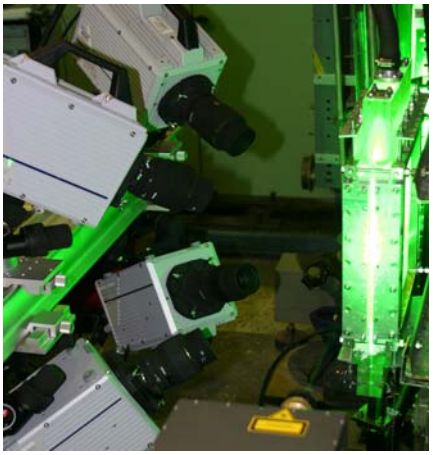

Рис. 2 Фотография измерительной системы TR-TomoPIV и рабочего участка

Лазерный нож толщиной 4 мм, который освещал весь измерительный объем между пластинами, формировался с помощью системы линз. В экспериментах мы использовали полиамидные частицы диаметром 50 мкм. В оптической системе камер использовались объективы SIGMA AF 105 мм f/2.8 EX DG MACRO. Объем измерительной области равнялся 50×50×4 мм^3. Измерения проводились в трех последовательных областях, центры которых располагались на расстояниях 5h, 15h и 25h от края сопла. Измерения изображений частиц проводились с частотой съемки равной 10 кГц, что соответствовало задержке между кадрами в 100 мкс. Для первой измерительной области трехкомпонентное мгновенное распределение скорости рассчитывалась между соседними изображениями, что соответствовало частоте съемки 10 кГц, для второго и третьего измерительной области между каждым вторым изображением, что соответствовало частоте съемки 5 кГц.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для обработки данных использовалось программное обеспечение “ActualFlow”. Для уточнения параметров калибровки оптической модели производилась самокалибровка по 300 изображениям [18]. В результате самокалибровки конечное осредненное отклонение не превышало 0.05 пикселя. Перед реконструкцией объемов изображений частиц, проекции с каждой камеры предварительно обрабатывались, из них вычитался статистический минимум интенсивности (для каждого пикселя) по ансамблю исходных изображений. Восстановленный объем имел размеры 615×615×77 вокселей. Физический размер вокселя приблизительно равнялся 0.063×0.063×0.063 мм3. Объемная концентрация частиц была 8.5 частиц/мм3. Томографическая реконструкция производилась с помощью SMART алгоритма [3]. Распределение скорости рассчитывалось между соседними последовательными распределениями частиц. Корреляционный анализ проводился с использованием итерационного многосеточного алгоритма с непрерывным смещением измерительного окна. При расчете скорости было выполнено четыре итерации, две итерации с разрешением 64×64×32 вокселя и две итерации с разрешением 32×32×16 вокселя. Последняя итерация выполнялась с перекрытием 75%, в результате чего окончательный размер области для одного вектора скорости составил 0,5×0,5×0,25 мм3 с расстоянием половины размера между соседними векторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для идентификации вихревых структур в потоке мы использовали распределения Q критерия, рассчитанного по мгновенным трехкомпонентным распределениям скорости [8]. На рисунке 3 показаны последовательные изоповерхности Q3D критерия, цветом указано значение продольной компоненты завихренности. В шести поперечных сечениях построена продольная компонента мгновенной скорости. Наличие в распределении Q3D критерия ориентированных вдоль потока парных структур, окрашенных красным и синим цветом, указывает на наличие продольных вихревых структур, ориентированных по направлению потока и вращающихся в противоположные направления вокруг своей оси. На рисунке 3 представлена эволюция вторичных продольных вихревых структур в ближнем поле струи. Вторичные продольные вихревые структуры формируются парно в виде двух противоположно вращающихся вихревых структур. Формирование этих парных вихревых структур происходит в слое смешения струи вблизи ограничивающих поверхностей. Вниз по потоку линейный масштаб вторичных продольных вихревых структур увеличиваются, вследствие объединения сонаправленных продольных вихревых структур.

Наличие вторичных продольных вихревых структур в ближнем поле струи приводит к образованию вторичных течений, которые впервые были обнаружены в работах [6, 7]. Согласно работе [5] вторичные течения в квази-двумерной струе исчезают на расстоянии 10h. Однако наши эксперименты показали наличие вторичных течений в дальнем поле струи, на расстоянии больше 20h..

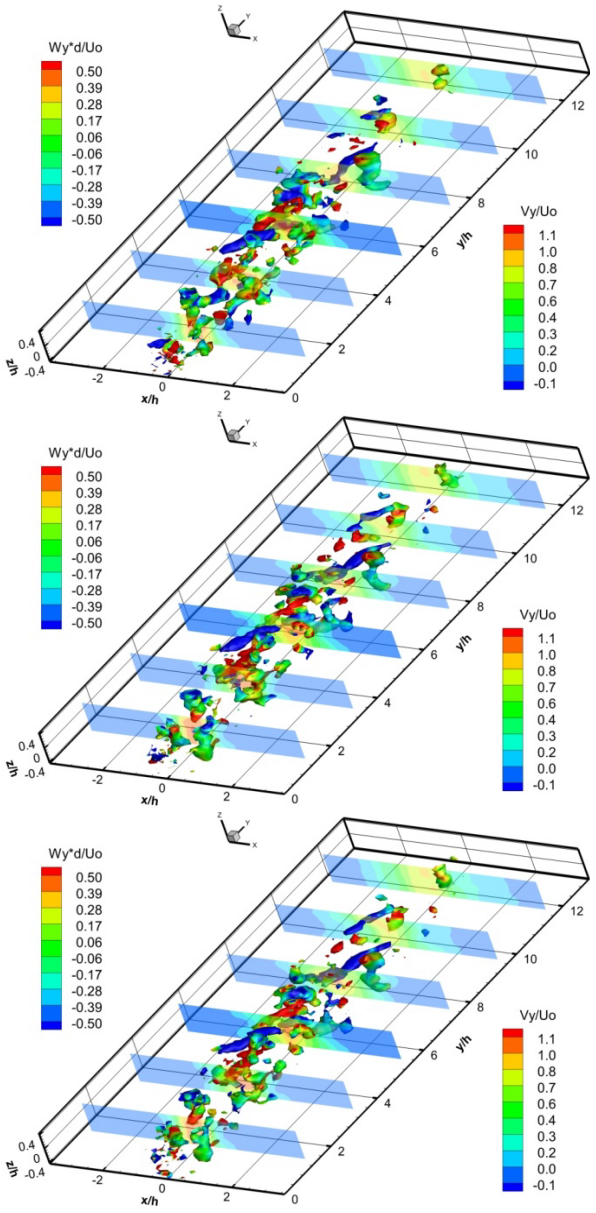

Рис. 3 Ближнее поле струи. Распределение $Q^{3D} = 0.23$, $d/h = 1$ и $Re = 2\times10^4$. Время между распределениями 200 мкс.

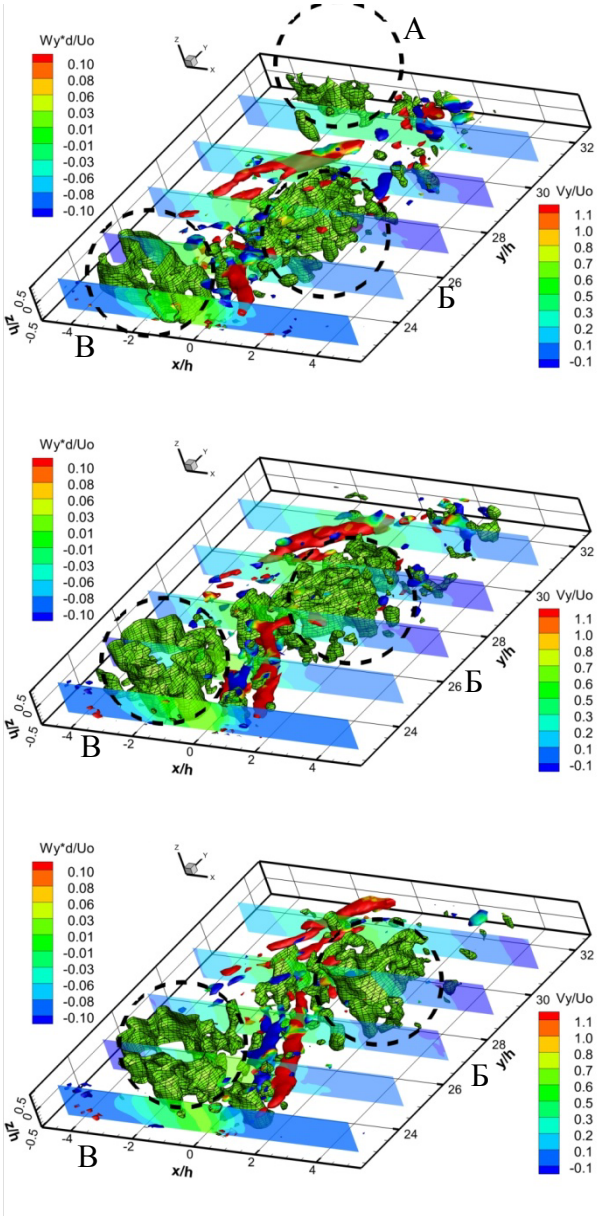

Рис. 4 Дальнее поле струи. Распределение $Q^{3D} = 0.015$ и $Q^{2D} = 0.013$, $d/h = 1$ и $Re = 2\times10^4$. Каждое 28 распределение (частота съемки 5 кГц).

Рисунок 4 показывает вихревые структуры в дальнем поле струи и динамику их взаимодействия. Динамика вторичных продольных вихревых структур в дальнем поле струи происходит следующем образом. В результате вращения вихревой структуры "А" происходит вовлечение противоположно вращающихся вторичных продольных вихревых структур в ядро струйного потока.

В результате вторичные продольные вихревые структуры становятся ориентированными по направлению потока и попадают в область продольного растяжения. По мере движения вихревой структуры "А" вниз по потоку и развития вихревой структуры "Б", вторичные структуры начинают смещаться от ядра на внешнюю границу струи. В результате смещения продольных вихревых структур к внешней границе струи, ближняя к ядру струи продольная вихревая структура исчезает, а дальняя усиливается и сносится на границу струи. Дальнейшее развитие вихревой структуры "Б" вниз по потоку приводит к формированию пары противоположно вращающихся продольных вихревых структур с другой стороны струи. Взаимодействие структуры "Б" и "В" приводит к усилению двух противоположно вращающихся

вторичных продольных структур, аналогично случаю структур "А" и "Б". В результате взаимодействия последовательных крупномасштабных вихревых структур и меандрирования струйного потока вторичные продольные вихревые структуры периодически вовлекаются в ядро струи, а затем периодически выносятся на границу струи. Вторичные течения в дальнем поле также являются следствием вторичных продольных вихревых структур (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применен метод Tomographic PIV высокого временного разрешения для исследования вихревой структуры в формирующемся течении турбулентной струи в узком канале. Выполнены 3D измерения всех компонент скорости в ближнем и дальнем поле квазидвумерной турбулентной струи. Последовательные распределения Q^{3D} критерия в ближнем поле струи показывают, что вторичные продольные вихревые структуры формируются в результате взаимодействия с вихревой структурой, образовавшейся вследствие сдвиговой неустойчивости Кельвина - Гельмгольца, с ограничивающей поверхностью. Впервые экспериментально показано наличие двух видов когерентных вихревых структур: крупномасштабных квазидвумерных вихревых структур и вторичных продольных вихревых структур в дальнем поле квазидвумерной турбулентной струи. Развитие вторичных продольных вихревых структур и их взаимодействие с крупномасштабными квази-двумерными вихревыми структурами носит сложный трехмерный характер и требует дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

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, Т. 18, № 4, 2011, стр., 1-12.

   Bilskiy A.V., Lozhkin V.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Shestakov M.V. Optimizatsiya i testirovanie tomograficheskogo metoda izmereniya skorosti v obeme potoka. // Teplofizika i aeromekhanika, T. 18, № 4, 2011, pp., 1-12.
2. 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 // Proceeding of the 16th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, 2012.
3. Bilsky, A.V., Lozhkin, V.A., Markovich, D.M., and Tokarev, M.P. A maximum entropy reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry. Measurement Science and Technology, vol. 24, 2013, 045301.
4. Daoyi, C., and Jirka, G.H. Linear stability analysis of turbulent mixing layers and jets in shallow water layers // Journal of Hydraulic Research, Vol. 36, 1998, pp. 815-830.
5. Dracos, T, Giger, M, and Jirka, G (1992) Plane turbulent jets in a bounded fluid layer //Journal of Fluid Mechanics, vol. 241, pp. 587–614.
6. Foss, J. F. & Jones J. B, Secondary flow effects in a bounded rectangular jet // Journal of Fluids Engineering, vol. 90, 1968, pp. 241–248.
7. Holdeman J., and Foss J. The initiation, development, and decay of secondary flow in a bounded jet // Journal of Fluids Engineering, vol. 97, 1975, pp. 342-352.
8. Hunt, J.C.R., Wraya A.A., and Moin ,P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows. Center for Turbulence Research Report, CTR-S88, 1988p. 193.
9. Jirka, G. H. Large scale flow structures and mixing processes in shallow flows // Journal Hydraulic Research, vol. 39, 2001, pp. 567–573.
10. Landel J. R., Caulfield C. P. and Woods A. W. Meandering due to large eddies and the statistically self-similar dynamics of quasi-two-dimensional jets // Journal Fluids of Mechanics, vol. 692, 2012, pp. 347 368.
11. McCabe, A., An experimental investigation of a plane subsonic jet with an aspect ratio of three // Proceeding of the Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers vol. 183, 1967 pp. 342-346.
12. Nozaki, T., et al., Study of a Bounded Jet Flow Considering the Initial Turbulence (Experiments with a Nozzle Having Aspect Ratio of 3) // Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng., vol.27, No.234, 1984, p.2730.
13. Nozaki, T., et al., Experimental Study of a Bounded Jet Flow (Mechanism of the Secondary Flow) // Proceeding of the 4th International Symp. Flow Visualization, 1986, pp.495-499.
14. Peltier Y. Experimental and numerical investigation of meandering jets in shallow reservoir: potential impacts on deposit patterns // THESIS, Two-phase modeling for Sediment dynamics in Geophysical Flows, At Chatou, France 2013 http://hdl.handle.net/2268/155314.
15. Scarano, F. Tomographic PIV: principles and prac-

tice // Measurement Science and Technology, vol. 24, 2013, 012001.

16. Shestakov, M.V., Dulin, V.M., Tokarev, M.P., Sikovsky, D.P., and Markovich, D.M., PIV study of large-scale flow organisation in slot jets // International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 51, 2014, pp. 335-352.
17. Shestakov M.V., Dulin V.M., Tokarev M.P., Markovich D.M. Dynamics of primary and secondary vortices in a slot jet // Proceeding of the 9th international symposium on turbulence and shear flow phenomena, Melbourne, Australia, 2015.
18. Wieneke, B., Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // Experiments in Fluids, vol. 45, 2008 pp. 549-456.