

ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ В ЩЕЛЕВОЙ СТРУЕ

Токарев М.П.¹, Шестаков М.В.¹, Карчевский М.Н.²

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

² Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

В природе и промышленности достаточно широко распространены квази-2D турбулентные струйные течения. Во многих практических приложениях, а также в разрабатываемых устройствах используются струи, распространяющиеся в узких каналах, например: геотермальная техника, современные мини-канальные химические процессы, системы охлаждения и т.д. Моделирование процессов фильтрации и разработка оптимальных методов извлечения нефтяного сырья, также требуют получения полной информации о структуре таких потоков. В настоящее время многие исследователи заинтересованы в микро и мини струях в ограниченном пространстве. Малогабаритные технические системы имеют наибольший интерес, потому что, как правило, они являются более эффективными и экономичными, по сравнению с крупномасштабными устройствами.

Струя в щелевом канале имеет ряд особенностей, которые существенно отличают ее от течений в свободном пространстве и осесимметричных каналах. Наличие ограничивающих поверхностей приводит к возникновению различных вихрей с характерными масштабами. Возникновение вихрей Кельвина-Гельмгольца сопровождается сильным влиянием трения о стенки, что приводит к существованию в потоке принципиально различных режимов: от классических режимов Хеле-Шоу до развитых турбулентных течений, которые проявляют некоторые черты 2D турбулентности. Струя в таком канале содержит мелкомасштабные 3D турбулентности, с максимальной размером порядка глубине канала и квази-2D крупномасштабную часть потока с характерными размерами, больше глубины канала [1,2]. Особенности таких потоков позволяют исследовать в лаборатории свойства квази-2D турбулентности и механизмы динамического взаимодействия между крупномасштабными 2D структурами и мелкомасштабными 3D турбулентностями.

Данные полученные локальными методами измерения не обеспечивают полную картину течения и не дают всеобъемлющую информацию о трехмерных структурах. Таким образом, необходимо использовать современные методы объемного измерения скорости, например, томографических PIV [3]. Наши предыдущие исследование щелевой струи [2] было сделано с использованием измерительной системы 2D PIV с частотой съемки 1 кГц. Это позволило нам получить динамические и временные спектры флуктуаций скорости вдоль потока в дальней зоне струи. Тем не менее, информацию о ближнем поле струи детально разрешить не удалось в связи с пространственно-временными ограничениями.

Несколько недавних работ [2,5,6] описывают высокоскоростные томографические измерения PIV в

осесимметричных и шевронных струях. В данной работе исследуется динамика трехмерных вихрей в турбулентной щелевой струе, используя томографическое PIV разрешенного по времени. Частота съемки достигала 25 кГц, что позволяет анализировать поведение потока вблизи сопла, где возникают вторичные течения. Целью данной работы является объединить преимущества измерений в объеме и регистрации с высокой частотой для анализа сложного поведения и структуры турбулентных струй.

Экспериментальная установка состояла из закрытого гидродинамического контура, включающего в себя резервуар, насос, расходомер и рабочий участок. Рабочим участком был узкий канал, образованный двумя пластинами из органического стекла (размер: $307 \times 270 \text{ мм}^2$, толщина: 20 мм), расположенных на расстоянии $h = 4 \text{ мм}$ друг от друга. Данные были получены для чисел Рейнольдса $Re = (hU_0)/\nu = 20\,000$, где U_0 является объемной скоростью потока. Поток засеивали 50 мкм частицами полиамида. Прямоугольное/квадратное сопло без сужения было образовано двумя плоскими вставками, которые размещались между стеклянными пластинами Рис. 1. Ширина сопла была $d = 4, 10 \text{ мм}$ соответственно. Было получено две тысячи кадров для каждого режима течения. Измерения проводились в трех незначительно перекрывающихся зонах на расстоянии от среза сопла $4h$, $12h$ и $20h$ соответственно. Размер области измерения составлял $60 \times 60 \text{ мм}^2$.

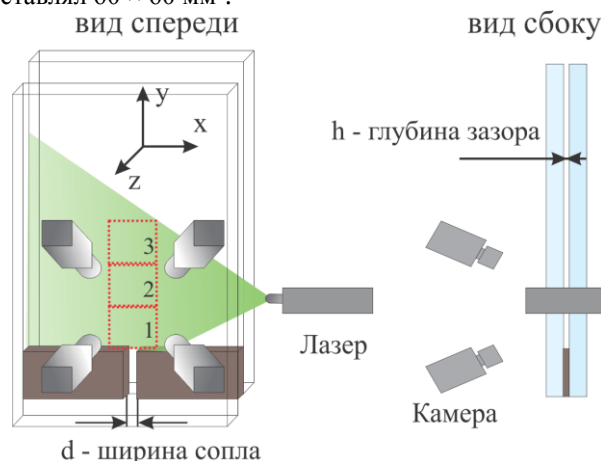


Рис. 1. Схематическое изображение участка с диагностическим оборудованием для Томо PIV измерений в турбулентной щелевой струе

Обработка полученных данных выполнялась программным обеспечением ActualFlow, разработанным в ИТ СО РАН. Процедура самокалибровки была выполнена до томографической реконструкции объема. Конечная средняя ошибки калибровки была менее 0,05 пикс и максимальное значение диспаритета рав-

нялось 4 пикс. Кроме того, полученные с камер изображения были предварительно обработаны путем вычитания минимальной статистической интенсивности (для каждого пикселя).

Восстановленный 3D объем имел размеры $1024 \times 1024 \times 128$ вокселей. Физический размер вокселя был равен 65 мкм. Объемная концентрация частиц была близка к 8,5 частиц на мм^3 . Плотность частиц на изображении при этой концентрации составляла 0,04 частиц на пиксель. Томографическая реконструкция производилась алгоритмом SMART [7]. Корреляционный анализ проводился с использованием итерационного многосеточного алгоритма с непрерывным смещением ячейки. Общее число итераций было четыре: два шага были выполнены с разрешением $32 \times 64 \times 32$ вокселя и двумя дополнительными итерациями с конечным разрешением $16 \times 32 \times 16$ вокселя. Перекрывание составляло 75%, поэтому, окончательный размер корреляционной ячейки для расчета одного вектора скорости был $1 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$.

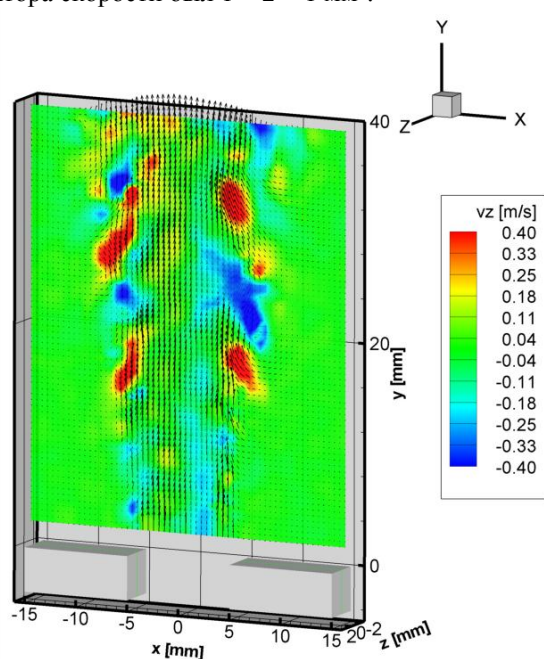


Рис. 2 Распределение мгновенной z -компоненты скорости и векторное поле скорости в центральной плоскости струи при $z = 0$. Скалярное поле частично прозрачное и векторы с отрицательной v_z слегка затенены.

Рис. 2 показывает сложную 3D картину поля мгновенной скорости. В потоке присутствуют крупномасштабные квази-двумерные вихревые структуры, которые формируют в слоях смещения когерентные потоки, проходящие через канал. Кроме того, визуализируются потоки в распределении нормальной к стенке компоненты мгновенной скорости. Замечено, что потоки через канал коррелируют с крупномасштабными вихревыми структурами, которые показаны векторным полем скорости.

Исследование турбулентной струи в щелевом канале проводилось для числа Рейнольдса 20 000 и двух различных прямоугольных сопел с квадратным и прямоугольным сечением. Частота регистрации составляла 10 кГц при частоте Найквиста определяемой ограничением пространственного разрешения измерительной системы в 4 кГц.

Трехмерные мгновенные поля скоростей и Q -критерий распределения значений показали, что в слое смещения струи (пограничный слой) формируются когерентные структуры Кельвина-Гельмгольца. Эти структуры находятся под влиянием поперечного и продольного градиента скорости. Они образуют квази-продольные вихри в результате взаимодействия друг с другом.

Продольные вихри, образованные когерентными вихревыми структурами Кельвина-Гельмгольца имеют также высокую степень согласованности, что было на распределениях нормальной компоненты скорости. Продольные вихри дают вклад в формирование вторичных течений. Область существования и влияния вторичных потоков заканчивается там, где квази-продольные вихри распадаются и формируются крупномасштабные квази-двумерные вихри и далее развиваются. Основным механизмом формирования квази-2D крупномасштабных вихревых структур является развитие синусоидальной неустойчивости в струе. С ростом линейного размера квази-2D турбулентных вихревых структур, спектр кинетической энергии сдвигается в область больших мод. Основной вклад в усиление данных мод вносит составляющая скорости параллельная стенке.

Список литературы:

1. Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M., Shestakov M.V. Turbulence measurements in a quasi-two dimensional jet in a slot channel. Proc. of the 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TU Munich, Germany, 27-29 August, pp. 1067-1072, 2007.
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 Proc. of the 16th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, 09-12 July, 2012.
3. Scarano F. Tomographic PIV: principles and practice Measurement Science and Technology., vol. 24, 012001, 2013.
4. Violato D., Scarano F. Three-dimensional evolution of flow structures in transitional circular and chevron jets. Phys. Fluids, vol. 23 (12), 124104, 2011.
5. Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F. Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets Int. J. Heat Fluid Flow., vol. 37, pp. 22-36, 2012.
6. Ianiro A., Violato D., Scarano F., Cardone G. Three dimensional features in swirling impinging jets Proc. of the 15th International Symposium on Flow Visualization, 25-28 June, Minsk, Belarus, 2012.
7. 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. 045301, 2013.