

УДК 532.57, 533.6.08, 519.6

М.В. Алексеенко<sup>1</sup>, А.В. Бильский<sup>1,2</sup>, В.М. Дулин<sup>1,2</sup>, Л.А. Козинкин<sup>1</sup>,  
Д.М. Маркович<sup>1,2</sup>, М.П. Токарев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,  
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2, E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

<sup>2</sup> Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

## **ДИАГНОСТИКА СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе применен современный метод измерения скорости в объеме потока на основе оптической малоракурсной томографии и анемометрии по изображениям частиц для анализа трехмерных распределений скорости в турбулентных струйных течениях. Проведена серия экспериментов на прямоточном и закрученном струйном течении жидкости. Наряду с трехмерностью измерений скорости особенностями данного эксперимента была увеличенная по глубине область измерения до 40 мм и повышенная по сравнению с предыдущими томографическими измерениями авторов разрешающая способность регистрирующих камер в 4 Мп. Обработка данных была выполнена производительными гибридными GPU-CPU алгоритмами. Для проверки корректности томографических измерений в этой же серии экспериментов были выполнены Stereo PIV измерения скорости в плоскости, проходящей вдоль оси струи. Сравнение результатов полученных Stereo PIV и Томо PIV методом показали хорошее совпадение для прямоточной струи и удовлетворительное совпадение для течения с закруткой. На основе количественных критериев локализации вихревых структур проведен анализ пространственной структуры крупномасштабных вихрей в рассматриваемых турбулентных течениях.

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА, ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ,  
СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ТОМО PIV, STEREO PIV**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Ввиду широкого использования струйных течений в различных технических приложениях, таких как, например, камеры сгорания, химические реакторы, системы охлаждения их изучение является актуальным. Затопленные осесимметричные струйные течения являются одним из фундаментальных объектов исследования в гидромеханике и могут быть рассмотрены как класс течений, обладающих рядом нетривиальных свойств (например, обратная связь при формировании и попарном взаимодействии кольцевых вихрей) и как модель для более сложных течений, в том числе и закрученных.

К настоящему времени проведено достаточно много экспериментальных исследований турбулентных струйных течений различными авторами. В [1] приведены теоретические модели распределения гидродинамических характеристик для различных струйных течений

и результаты сравнения их с экспериментальными данными, полученными разными научными коллективами, в основном при помощи термоанемометрических методов.

Ставшие стандартными и общепринятыми методами измерения полей скорости методами анемометрии по изображениям частиц PIV (Particle Image Velocimetry) и Stereo PIV хорошо зарекомендовали себя для исследования турбулентных течений. Однако они позволяют проводить панорамные измерения только в плоском сечении потока, что является преимуществом по сравнению с одноточечными методами измерения, но при этом может быть недостатком для исследования сложных трехмерных турбулентных течений. Стоит отметить работы, посвященные исследованию струйных течений с применением методики PIV [2-4].

Из существующих на сегодняшний день методов, пригодных для измерения трехмерных, трехкомпонентных полей скорости (3D Particle Tracking Velocimetry, Holographic PIV, Tomographic PIV или Tomo PIV) наиболее перспективным является томографический метод измерения [5-6]. В основе метода лежит измерение перемещений трассеров в объеме потока, регистрируемых с нескольких направлений. Томографическая реконструкция распределения трассеров в объеме позволяет рассчитать трехкомпонентные вектора скорости на узлах трехмерной пространственной сетки [7].

На данный момент пространственное разрешение мелкомасштабных вихревых структур у метода Tomo PIV в два раза ниже, чем у известных плоскостных аналогов PIV и Stereo PIV. Это связано с несовершенством известных методов томографической реконструкции объемных распределений, содержащих мелкие яркие частицы. Так как в реконструированном объеме содержится некоторая доля несуществующих частиц вследствие недостатка проекционных данных [8]. Эти ложные частицы или артефакты реконструкции увеличивают уровень шума при оценке скорости в области измерения, особенно для объемов с увеличенной глубиной, когда эффективная концентрация частиц на просвет становится высока. Из анализа литературы следует, что максимальная глубина измерительного объема при использовании метода Tomo PIV до настоящего времени не превышает 40-50 мм [6, 9]. Необходимо отметить, что не так давно был предложен эффективный алгоритм MTE MART (Motion Tracking Enhanced MART), который увеличивает точность реконструкции за счет подавления интенсивности мнимых частиц [10]. Принцип работы алгоритма основывается на предположении об отсутствии корреляции между мнимыми частицами, зарегистрированными в разные моменты времени.

В литературе присутствует только несколько работ, посвященных изучению струйных течений с использованием томографической методики измерения скорости в объеме потока. В работе [11] авторами проведено исследование переходной области свободной турбулентной струи томографическим методом с временным разрешением 1 мс при режиме течения  $Re = 5\,000$ . Измеренные мгновенные поля скорости были изучены с помощью Dynamic Mode Decomposition (DMD) анализа, позволяющего идентифицировать периодические когерентные структуры в турбулентных потоках. В результате анализа были выделены наиболее энергоемкие моды, которые соответствовали сформировавшимся кольцевым вихревым структурам и также описывали попарное объединение этих вихрей далее по потоку. Авторами работы [12] также был применен томографический метод с временным разрешением 1 мс к исследованию переходной области струи с круглым и шевронным соплом при  $Re = 5\,000$ . Запись производилась скоростными камерами с разрешением 1 Мп. Распад и объединение вихрей являются наиболее выраженными явлениями, наблюдаемыми в ближнем поле струи. Первое и второе объединение ведет к увеличению осевого пульсационного движения в струе и приводит к росту азимутальных возмущений (трехмерная неустойчивость двумерной волны), приводящих к распаду вихревого кольца. В работе представлена трехмерная визуализация образующихся в струе кольцевых вихрей, а так же процесс их объединения и распада. В работе [13] проведены экспериментальные Tomo PIV исследования динамики вихрей и конвективного теплопереноса в импактной струе с круглым и шевронным соплом с аналогичной частотой

съемки 1 кГц и режимом течения  $Re = 5\,000$ , но с увеличенным разрешением камер до 4 Мп. В другой работе этих же авторов [14] проведены измерения уже в закрученной импактной струе с разными числами закрутки при этом были исследованы трехмерные структуры, формирующиеся в потоке при режиме течения  $Re = 10\,000$ . Регистрация измерительного объема выполнялась тремя 4 Мп камерами с частотой съемки 500 Гц.

Целью данной работы является исследование возможности применения Томо PIV метода для измерительных объемов с увеличенной глубиной до 40 мм при диагностике струйных течений. При расширении области применения метода Томо PIV на области с большей глубиной измерения наряду с недостатком света возникает множество проблем, связанных с пределом оптической прозрачности, неопределенностью реконструкции по малому количеству проекций и увеличением числа артефактов реконструкции. Также целью работы было провести анализ пространственной структуры крупных вихрей в турбулентном струйном течении жидкости с закруткой потока.

В основной части описан эксперимент по изучению струйных турбулентных течений, проведенный с применением метода малоракурсной томографии для оценки трехмерных распределений скорости в данных потоках. Далее приведены параметры, использованные при обработке данных, и представлены полученные результаты.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка представляла собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из рабочего объема, насоса, термостата, и расходомерной шайбы. Рабочей жидкостью служила вода при постоянной температуре, поддерживаемой при помощи термостата. Средний расход поддерживался постоянным при помощи насоса с обратной связью от расходомерной шайбы. Все измерения проводились в оргстеклянном измерительном объеме размером  $200 \times 200 \times 400 \text{ мм}^3$ . Объектом исследования является круглая турбулентная струя жидкости образованная соплом с диаметром  $d = 15 \text{ мм}$ . Во время эксперимента исследовалась как прямоточная струя, так и закрученный поток, в котором для закрутки применялся лопаточный завихритель с числом крутки  $S = 1$  установленный внутри сопла аналогичный использовавшемуся в работе [4]. Эксперимент проводился на двух режимах  $Re = 10\,000$  и  $30\,000$ .

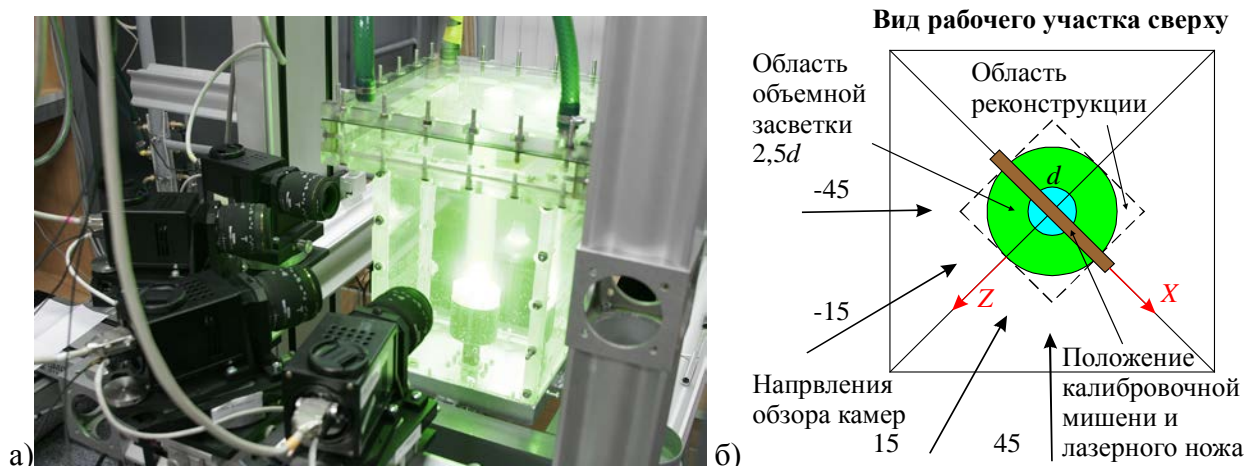


Рис. 1 Фотография экспериментального участка во время проведения измерений скорости в объеме турбулентной струи жидкости на выходе из сопла  $d = 15 \text{ мм}$  а), схема рабочего участка вид сверху б)

Поток был засеян полиамидными частицами диаметром 20 мкм с объемной концентрацией  $0,64 \text{ частиц/мм}^3$ . Концентрация частиц на проекциях во время объемных и плоскостных измерений поддерживалась одинаковой и была равна  $0,05 \text{ частиц/пикс}^2$ . Цилиндрическая область измерения с диаметром  $2,5d$  и высотой  $4d$  регистрировалась на четыре 4 Мп ПЗС-камеры ВИДЕОСКАН-4021/П-2001 с объективами Sigma 50 мм F2.8 DG

MACRO, расположенными как показано на Рис. 1. Для освещения области измерения использовался импульсный двухканальный Nd: АИГ лазер Quantel EverGreen с энергией 200 мДж в импульсе длительностью 10 нс. Частота измерений равнялась 1 Гц. Измерения проводились томографической и стереоскопической PIV системами для одного и того же объекта и при одинаковых экспериментальных условиях. Переключение с объемных измерений на плоскостные измерения осуществлялось заменой оптики освещения. В плоскостных измерениях для освещения применялся лазерный нож толщиной 1 мм.

Калибровка камер оптической системы выполнялась по плоской калибровочной мишени с круглыми маркерами диаметром 1 мм расположенными в узлах прямоугольной сетки с шагом 3 мм, нанесенными на металлической пластине размером 80x80 мм. Мишень перемещалась по глубине на 25 мм координатным механизмом с микровинтом. Управление оборудованием и обработка данных осуществлялась посредством программного обеспечения «ActualFlow», расширенном модулями для объемных измерений.

## ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Экспериментальные данные Томо PIV измерений обрабатывались высокопроизводительными гибридными CPU-GPU алгоритмами. Для расчетов использовалась серверная станция с процессорами 2x16 AMD Opteron 6274, 2 200 МГц (всего 32 ядра) с графическим процессором NVIDIA Tesla C2075.

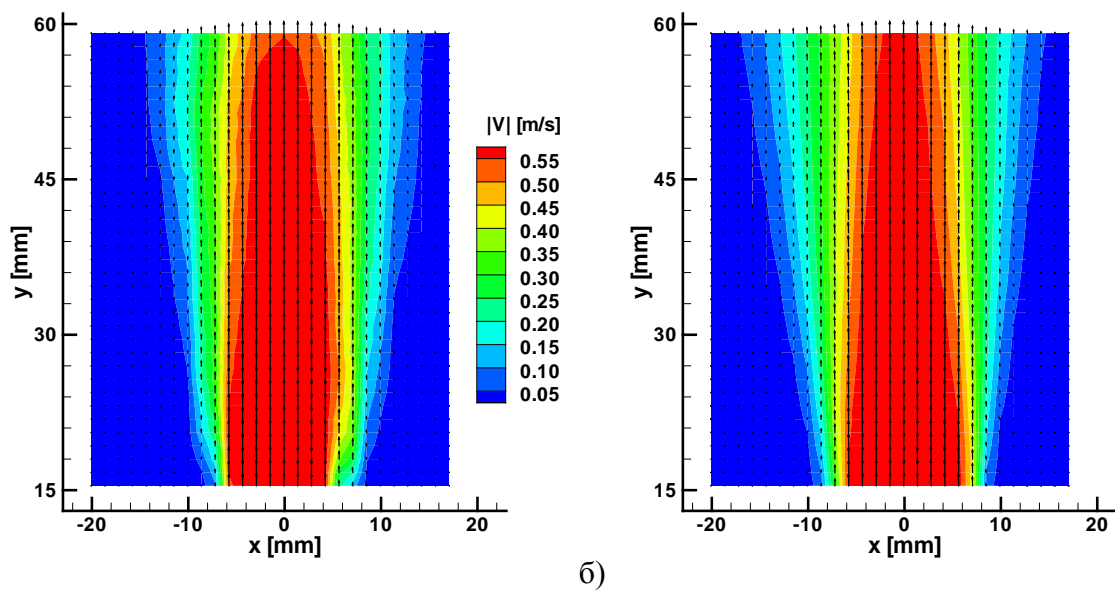


Рис. 2 Сравнение результатов измерения распределения модуля средней скорости методом Томо PIV а) с результатами Stereo PIV б) измерений в сечении вдоль оси прямооточной струи  $Re = 10\ 000$ , полученными по 500 и 1000 полям скорости соответственно

Предварительная обработка проекций состояла в вычитании статистического минимума для эффективного удаления фоновой засветки изображений частиц. Проводилась самокалибровка камер оптической системы по наиболее ярким зарегистрированным изображениям частиц. Максимальная невязка составила 4 пикс. Остаточная невязка после трех итераций самокалибровки была на уровне 0,2 пикс. Для калибровки камер вычислялись параметры нелинейной модели камеры-обскуры с дисторсией.

В работе проведено сравнение результатов расчета проверенного временем стереоскопического метода измерения скорости Stereo PIV [15] с результатами томографии для оценки качества получаемых измерений в объеме. Для обоих методов использовалась одна и та же калибровка оптической системы, но разные проекционные данные с объемной и плоской засветкой соответственно.

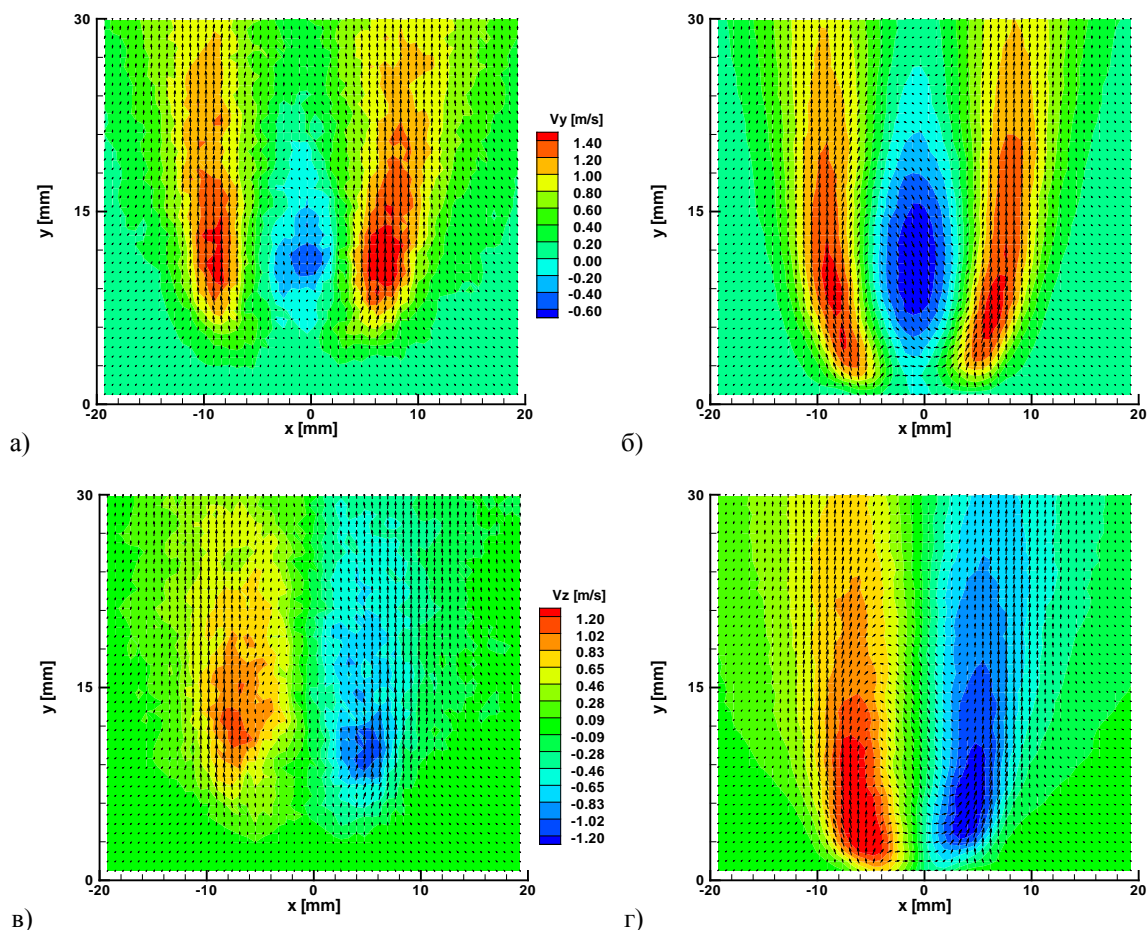


Рис. 3 Сравнение результатов измерения распределения продольной и поперечной компонент средней скорости методом Томо PIV а) с результатами Stereo PIV б) измерений в сечении вдоль оси прямооточной струи  $Re = 30\,000$ , полученными по 100 и 350 полям скорости соответственно

На Рис. 2 и Рис. 3 показаны результаты сравнения распределений средней скорости в сечении вдоль оси прямооточной и закрученной струи соответственно. Видно, что на Рис. 2 результаты объемных и плоскостных измерений совпадают с хорошей точностью кроме нижней и верхней границы измерительного объема. Что касается потока с закруткой, то здесь наблюдается более значительное расхождение результатов в области вблизи сопла до  $y/d < 0,5$  (см. Рис. 3). В этой области результаты объемных измерений скорости систематически отклоняются в сторону нуля вследствие пространственного осреднения скорости поперек струи. Это демонстрирует, что пространственное разрешение томографической PIV системы значительно ниже, чем в случае плоскостных измерений. Поэтому величину возвратного течения и максимальные значения скорости кольцевой скорости в этой области получены методом Томо PIV с существенной погрешностью. Также для данного типа течения отмечается общее занижение значения поперечной скорости и продольной скорости на оси струи при  $y/d > 0,5$  до 15%.

Число векторов в 3D поле скорости для прямооточной струи составило  $36 \times 52 \times 36$ , с разрешением 1,92 мм на вектор скорости. Реконструируемый измерительный объем имел линейные размеры  $40 \times 52 \times 40$  мм и был дискретизирован на  $896 \times 1295 \times 896$  вокселей. Уровень дискретизации определялся объемом доступной для работы памяти на GPU устройстве в 4,2 Гб, вертикальным разрешением зарегистрированных проекций 2048 пикс и вертикальным размером интересующей измерительной области. Реконструируемый объем в горизонтальной плоскости определялся исходя из кубической формы вокселя со стороной около 0,04 мм. Для томографической реконструкции применялся алгоритм на основе метода МТЕ [10] с целью уменьшения влияния артефактов реконструкции. Стандартный алгоритм томографической реконструкции давал провалы оценки скорости в ядре струи вплоть до

нулевых значений, вследствие доминирования стационарных артефактов реконструкции возникающих от освещенных частиц со скоростями близкими к нулевым, расположенных в обширной внешней области струи. Алгоритм МТЕ требует в 4 раза больше оперативной памяти, чем необходимо для стандартной реконструкции, т.е. в данном случае 16,8 Гб и 3,5 раза больше расчетного времени. Было использовано 3 итерации МТЕ по 10 итераций реконструкции SMART. Начальная оценка интенсивности в объеме проводилась простым мультипликативным методом MLOS. Что касается корреляционного алгоритма, то применялся итерационный метод с непрерывным смещением элементарных объемов и поэтапным дроблением расчетной сетки вдвое. Конечный размер элементарного объема  $48^3$  вокселей на сетке с 50% перекрытием. Время реконструкции пары объемов алгоритмом МТЕ составило 21 минуту, а время корреляционного алгоритма 16 минут, т.е. 37 мин для расчета одного поля скорости и около двух недель для набора статистики в 500 измерений.

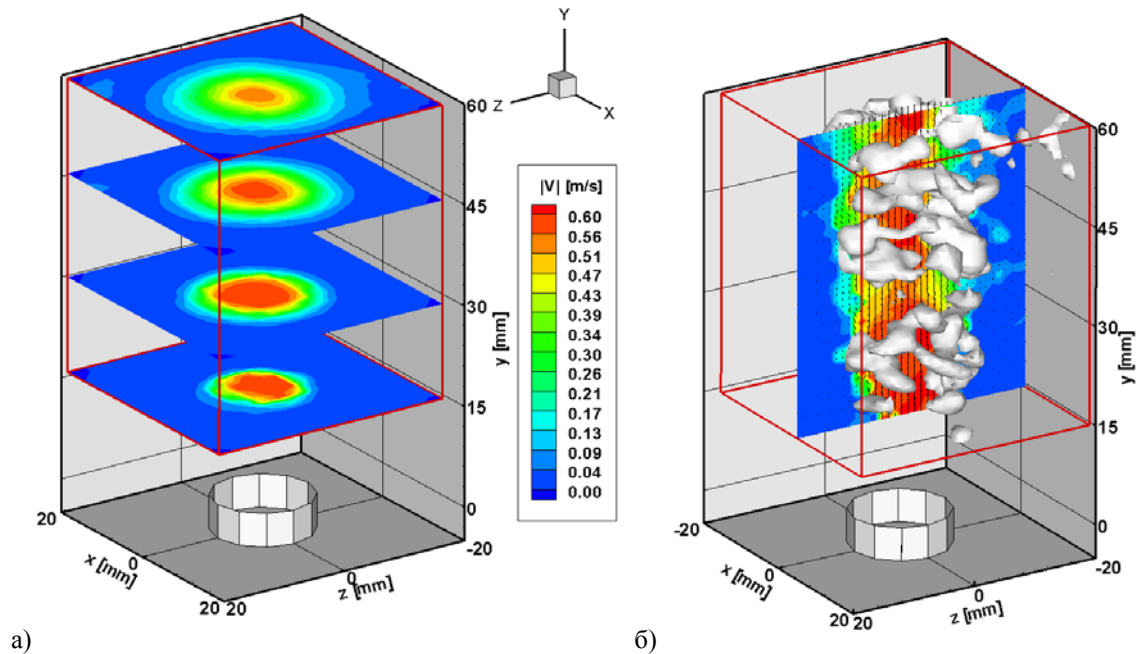


Рис. 4 Экспериментальные данные, полученных пространственных распределений статистических характеристик в турбулентной прямооточной струе,  $Re = 10\,000$  осреднением по 500 измерениям. В горизонтальных сечениях, цветом показан модуль средней скорости а) и мгновенное распределение скорости б). Изоповерхности обозначают локализацию вихрей по критерию  $Q$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На Рис. 4-а показано пространственное распределение модуля средней скорости в нескольких сечениях поперек струи  $y/d = 1, 2, 3, 4$ . Визуализируется постепенное расширение струи и уменьшение скорости на оси. Уровень пульсации вертикальной скорости в слое смещения струи составил около 25% от среднерасходной скорости, что согласуется с аналогичными плоскостным измерениям в работе [16]. На распределении средней скорости (см. Рис. 4-а) наблюдается осевая симметрия с отчетливыми концентрическими изолиниями представленных величин в поперечных сечениях.

На Рис. 4-б показан пример мгновенного распределения скорости, в виде вертикального сечения проходящего по оси струи с полем векторов, значениями модуля скорости и изоповерхностей  $Q$ -критерия локализации вихрей. На рисунке визуализируется попарное объединение и дальнейший распад кольцевых вихрей, начиная с  $y/d = 2,5$ , сформировавшихся в сдвиговом слое близи сопла за счет роста неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

На Рис. 5 представлен результат оценки стационарного распределения скорости в измерительном объеме для сильно закрученной струи. Рис. 5-а демонстрирует трехмерное поле средней скорости в целом, где цветом обозначена величина модуля средней скорости.

На Рис. 5-б цветом изображена вертикальная компонента скорости в поперечном сечении и на линиях тока. Винтовые линии тока демонстрирует наличие закрутки. Замкнутая кривая тока на оси соответствует локализации зоны рециркуляции.

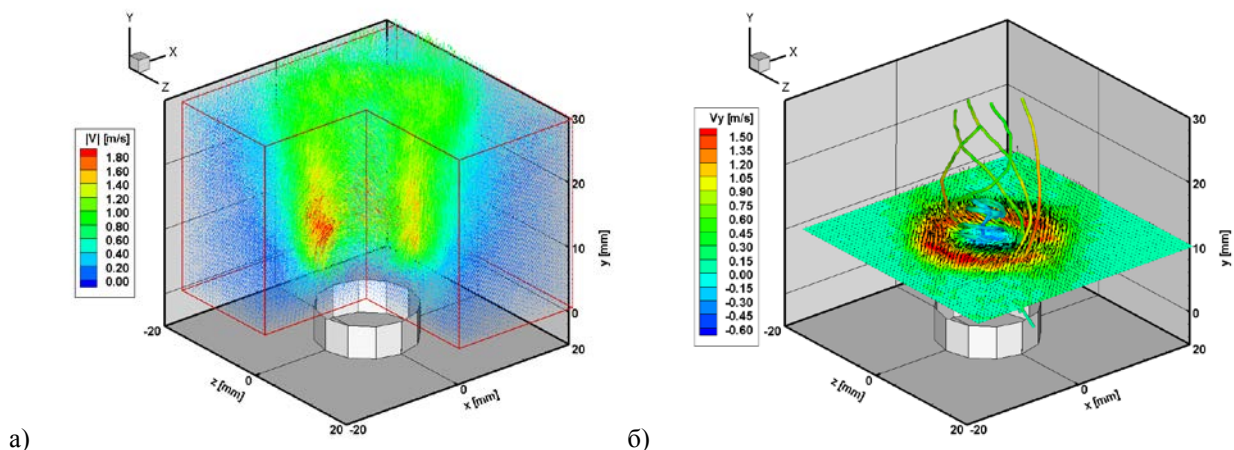


Рис. 5 Экспериментальные данные полученных, пространственных распределений модуля средней скорости а) и поперечного сечение  $y/d = 2/3$  вертикальной компоненты средней скорости б) в турбулентной закрученной струе  $Re = 30\ 000$ . Также показано значение вертикальной компоненты на линиях тока.

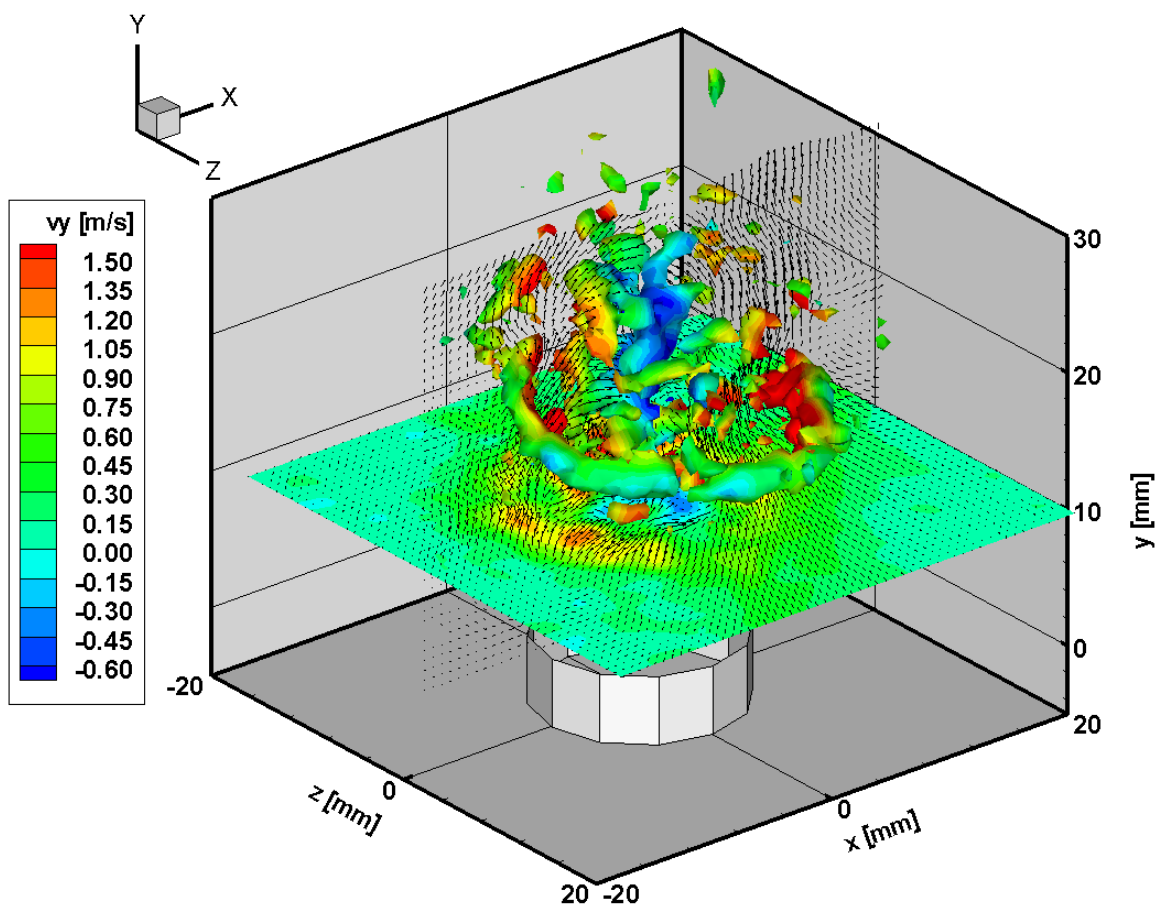


Рис. 6 Пространственное распределение мгновенной скорости в горизонтальном  $y/d = 2/3$  и вертикальном  $z = 0$  сечениях, цвет обозначает продольную компоненту скорости, изоповерхности уровня 0,17 обозначают локализацию вихрей по критерию  $Q$  для, закрученной турбулентной струи  $Re = 30\ 000$ ,  $54 \times 41 \times 54$  векторов

На Рис. 6 изоповерхности значений, рассчитанных по критерию  $Q$ , визуализируют спиральные вихри для мгновенной картины течения. В целом, проведенный анализ 100 полей скорости (в том числе с использованием метода главных компонент, или Proper

Orthogonal Decomposition) показал, что фазово-осредненная картина течения закрученной струи с пузырьковым распадом вихревого ядра согласуется с литературными данными: вихревое ядро струи принимает форму спирали в области расширения потока и формирования центральной зоны рециркуляции. При этом спираль прецессирует вокруг оси симметрии (осредненного) потока и приводит к формированию вторичного спирального вихря во внешнем сдвиговом слое, который движется в вокруг струи с той же угловой скоростью. Наиболее важно, что метод Томо PIV позволяет измерять поля именно мгновенной скорости и, следовательно, анализировать структуру действительно присутствовавших в потоке вихрей (в отличие от фазово-осредненных структур). Так, можно видеть, что вследствие наличия зоны обратного течения в струе присутствовал также внутренний сдвиговый слой, в котором образовывались спиральные вихри меньшего размера.

Число векторов в томографическом поле скорости для закрученной струи составило  $54 \times 41 \times 54$ , с разрешением 1,5 мм на вектор скорости и расстоянием 0,75 мм между соседними векторами. Для уменьшения ошибки, связанной с расчетом производных по полученным данным на регулярной сетке, к исходному полю скорости предварительно применялся фильтр скользящего среднего по блокам из  $3 \times 3 \times 3$  векторов. Отфильтрованные ошибочные вектора скорости в исходном поле скорости не рассматривались. В целом, погрешность оценки трехмерных распределений скорости в закрученной струе можно выразить следующим образом. Полуширина симметричных относительно нуля распределений поперечных компонент смещения  $v_x$ ,  $v_z$  составляла около 10 вокселей. Гистограмма распределения продольной компоненты смещения частиц  $v_y$  была несимметрична и сдвинута в сторону положительных значений со средним значением 1,3 вокселя, типичными положительными значениями в области ядра струи около 5 вокселей и отрицательными значениями в центре зоны рециркуляции -1,5 вокселя. Типичная величина абсолютной ошибки оценки мгновенного смещения составляет около 0,3 вокселя [7], поэтому минимальная относительная ошибка оценки скорости в области с большими смещениями составила 6%, а погрешность определения продольной компоненты мгновенной скорости на оси струи, где наблюдалось обратное течение, можно оценить в 20%. Данные оценки справедливы только для области на удалении  $y/d > 0,5$  от края сопла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведены экспериментальные работы по изучению турбулентных струйных течений методом малоракурсной томографии на основе анемометрии по изображениям частиц (Томо PIV). Проведены исследования прямоточной и сильно закрученной струи вытекающей из сопла  $d = 15$  мм в цилиндрической области диаметром  $2,5d$  длиной  $4d$  начиная с кромки сопла.

Обычно измерительные объемы в методе Томо PIV имеют приплюснутую форму по глубине измерения, т.е. наименьшая сторона прямоугольного параллелепипеда соответствует глубине. Отношение наибольшей и наименьшей сторон составляет около порядка. Всего несколько работ описывает эксперименты с областью засветки большой толщины, в частности, цилиндрической формы. Применение Томо PIV измерений в измерительном объеме с увеличенной глубиной до 40 мм связано с рядом трудностей. Это такие как: недостаток света от стандартных импульсных PIV лазеров, высокая концентрация частиц на проекциях, предел оптической прозрачности потока, а так же рост числа артефактов реконструкции. В данной работе с большинством этих проблем удалось справиться. Для подавления влияния артефактов реконструкции применен известный передовой алгоритм MTE.

Проекции области измерения потока регистрировались камерами со светочувствительными матрицами 4 Мп, что позволило выполнить томографическую реконструкцию с высоким пространственным разрешением  $36 \times 52 \times 36$  и  $54 \times 41 \times 54$  векторов, а



также потребовало применения производительных гибридных GPU-CPU алгоритмов обработки данных.

Для контроля качества томографических измерений во время эксперимента проекции записывались в режиме плоской и объемной засветки, чтобы была возможность сравнения с результатами оценки скорости полученной методом Stereo PIV. Плоскостные и объемные измерения выполнялись в разные моменты времени, поэтому возможно сравнение только статистических характеристик. Сравнение показало хорошее совпадение полученных распределений скорости в плоскости на оси струи для прямоточной струи и удовлетворительное совпадение для закрученной струи на расстоянии более половины калибра от кромки сопла. Однако, в связи с более низким пространственным разрешением томографические измерения не позволили получить структуру течения с закруткой в непосредственной близости от сопла  $y/d < 0,5$ .

Полученные стационарные распределения скорости для струйных течений без закрутки и с закруткой обладают осевой симметрией. Для прямоточной струи удалось получить тот же уровень продольных пульсаций скорости 25%, что и для плоскостных измерений выполненных ранее. На мгновенных распределениях визуализирован процесс распада кольцевых вихрей, начиная с  $y/d = 2,5$ . Получены мгновенные 3D структуры спиральных вихрей в закрученной струе. Визуализирована 3D структура зоны рециркуляции.

Следующим этапом освоения трехмерных измерительных методов для задач экспериментальной гидроаэродинамики будет проведение экспериментальных исследований с высокой частотой съемки для изучения динамики вихревых структур в струйных течениях.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант №13-08-01356), Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. (проект № 8233) и междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №14 “Обратные задачи и их приложения: теория, алгоритмы, программы”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамович Г.Н.** Теория турбулентных струй . Наука, 1984
2. **Weisgraber T.H., Liepmann D.** Turbulent structure during transition to self-similarity in a round jet. // Exp. Fluids, 1998, Vol. 24, pp. 210-224
3. **Fukushima C., Aanen L., Westerweel J.** Investigation of the mixing process in an axisymmetric turbulent jet using PIV and LIF. // Proc. 10th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal. 10-13 July, 2002
4. **Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., Markovich D.M.** Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2007. Vol. 28, pp. 1340–1359.
5. **Elsinga G.E., Scarano F., Wieneke B., van Oudheusden B.W.** Tomographic particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2006. Vol. 41. P. 933-947
6. **Scarano F.** Tomographic PIV: principles and practice // Measurement Science and Technology. 2013. 24. 012001.
7. **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. 18, № 4.
8. **Elsinga G. E., Westerweel J. , Scarano F., Novara M.** On the velocity of ghost particles and the bias errors in Tomographic-PIV // Exp. Fluids, 2010, Vol. 49, 825-838

9. **Michaelis D., Novara M., Scarano F. and Wieneke B.** Comparison of volume reconstruction techniques at different particle densities. //15th Int Symp on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 05-08 July, 2010, 555–566.
10. **Novara M., Joost K., Batenburg, Scarano F.** Motion tracking-enhanced MART for tomographic PIV // Meas. Sci. Technol., 2010, Vol. 21, 18 pp.
11. **Schmid J.P., Violato D., Pust O., Scarano F.** Decomposition of time-resolved tomographic PIV // 15th Int.Symp. on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal, 05-08 July, 2010
12. **Violato D., Scarano F.** Three-dimensional evolution of flow structures in transitional circular and chevron jets // Phys. Fluids 23, 2011
13. **Violato D., Ianiro A., Cardone G., Scarano F.** Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets // International Journal of Heat and Fluid Flow 37 (2012) 22–36
14. **Ianiro A., Violato D., Scarano F., Cardone G.** Three dimensional features in swirling impinging jets // 15th International Symposium on Flow Visualization June 25-28, 2012, Minsk, Belarus
15. **Маркович Д.М., Токарев М.П.** Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии, 2008, Т. 9, С. 311-326
16. **Alekseenko S.V., Dulin V.M., Kozorezov Yu.S., Markovich D.M.** Effect of axisymmetric forcing on structure of a swirling turbulent jet. // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2008. Vol. 29, pp. 1699–1715.

M.V. Alekseenko <sup>1</sup>, A.V. Bilsky <sup>1,2</sup>, V.M. Dulin <sup>1,2</sup>, L.A. Kozinkin <sup>1</sup>, D.M. Markovich <sup>1,2</sup>,  
M.P. Tokarev <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

*630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2, E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru*

<sup>2</sup> *Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,*

*630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru*

## TOMOGRAPHIC PIV MEASUREMENTS IN A VOLUME OF A JET FLOW

*The paper reported on the application of a modern volumetric velocity measuring technique based on limited-view optical tomography and particle image velocimetry for analysis of a three-dimensional velocity distribution in turbulent jet flows. A series of experiments on a liquid circular jet flow and a swirling jet flow were conducted. Along with the three-dimensional measurements of the velocity characteristics peculiarity of the experiment was an increased depth measuring range up to 40 mm and an increased compared with the previous tomographic measurements of the authors camera resolution in 4 Mpx. Data processing was carried out by efficient hybrid GPU-CPU algorithms. In the same series of experiments Stereo PIV measurements were performed for validating tomographic measurements in the central plane of the jet. The comparison of the results obtained by Stereo PIV and Tomo PIV methods showed good agreement for the circular jet and a satisfactory agreement for the swirling jet. On the basis of quantitative criteria for the localization of vortex structures the analysis of the spatial structure of large-scale vortices in the turbulent flows was done.*

VOLUMETRIC VELOCITY MEASUREMENTS, OPTICAL TOMOGRAPHY, JETS, TOMO PIV, STEREO PIV