

УДК 532.57, 533.6.08, 519.6

ДИАГНОСТИКА СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ*

М. В. Алексеенко¹, А. В. Бильский^{1, 2}, В. М. Дулин^{1, 2},
Л. А. Козинкин¹, Д. М. Маркович^{1, 2}, М. П. Токарев^{1, 2}

¹Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
E-mail: mtokarev@itp.nsc.ru

Рассмотрен современный метод измерения скорости в объёме потока на основе оптической малоракурсной томографии и лазерной анемометрии по изображениям частиц. Метод использован для измерения трёхмерных мгновенных распределений скорости в прямом и закрученном турбулентных струйных течениях жидкости. Наряду с трёхмерностью измерений скорости особенностями данного эксперимента были увеличенная по глубине область измерения до 40 мм и повышенная до 4 Мп (по сравнению с предыдущими томографическими измерениями авторов) разрешающая способность регистрирующих камер. Для проверки корректности томографических измерений с помощью метода Stereo PIV выполнены измерения скорости в плоскости, проходящей вдоль оси струи. Различие стереоскопических и томографических измерений трёх компонент средней скорости для рассматриваемых потоков составляло не более 10 %. Визуализирована вихревая трёхмерная структура ядра закрученной струи с пространственным разрешением 3 мм.

Ключевые слова: оптическая томография, Томо PIV, Stereo PIV, турбулентные струйные течения, трёхмерные распределения скорости.

Введение. Ввиду широкого использования струйных течений в различных технических приложениях, таких как камеры сгорания, химические реакторы, системы охлаждения, их изучение является актуальным. К настоящему времени проведено много экспериментальных исследований турбулентных струйных течений. В работе [1] приведены теоретические модели распределения гидродинамических характеристик для различных струйных течений и результаты их сравнения с экспериментальными данными, полученными разными научными коллективами в основном с помощью термоанемометрических методов.

Методы измерения полей скорости на основе анемометрии по изображениям частиц PIV (Particle Image Velocimetry), Stereo PIV, ставшие стандартными и общепринятыми, хорошо зарекомендовали себя при исследовании турбулентных течений. Однако они позволяют проводить панорамные измерения только в плоском сечении потока, что является преимуществом перед одноточечными методами измерения, но при этом может быть недостатком для исследования сложных трёхмерных турбулентных течений. Необходимо отметить работы [2, 3], посвящённые исследованию струйных течений с применением методики PIV.

Из существующих на сегодняшний день методов, пригодных для измерения трёхмерных, трёхкомпонентных полей скорости (3D Particle Tracking Velocimetry, Holographic PIV, Tomographic PIV, или Томо PIV), наиболее перспективным является томографический

*Работа выполнена при частичной 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).

метод [4, 5]. В его основе лежит измерение перемещений трассеров в объёме потока, регистрируемых с нескольких направлений. Томографическая реконструкция распределения трассеров позволяет рассчитать трёхкомпонентные векторы скорости на узлах трёхмерной пространственной сетки [6].

На настоящий момент пространственное разрешение мелкомасштабных вихревых структур у метода Томо PIV в 2 раза ниже, чем у известных плоскостных аналогов PIV и Stereo PIV. Вследствие недостатка проекционных данных в реконструированном объёме содержится некоторая доля ложных частиц или артефактов реконструкции [7]. Они повышают уровень шума при оценке скорости в области измерения. Это характерно для объёмов с увеличенной глубиной измерения, при которой эффективная концентрация частиц на просвет становится достаточно высокой. Из анализа литературы следует, что максимальная глубина измерительного объёма при использовании метода Томо PIV не превышает 40–50 мм [5, 8]. Предложен эффективный алгоритм MTE MART (Motion Tracking Enhancement Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique), который увеличивает точность реконструкции за счёт подавления интенсивности ложных частиц [9].

Есть всего несколько работ, посвящённых применению томографического метода измерения скорости для изучения струйных течений. Например, в [10] томографическим методом с временным разрешением 1 кГц исследована переходная область струи с круглым и шевронным соплами при числе Рейнольдса $Re = 5000$. Запись производилась на четыре скоростные камеры с разрешением 1 Мп. Представлены трёхмерная визуализация образующихся в струе кольцевых вихрей, а также процесс их объединения и распада. В работе [11] проведены экспериментальные исследования динамики вихрей и конвективного теплопереноса в импактной струе с круглым и шевронным соплами с помощью метода Томо PIV. При этом использовались аналогичные частота съёмки (1 кГц) и режим течения ($Re = 5000$), однако применялись три камеры с увеличенным пространственным разрешением до 4 Мп, что также позволило повысить дискретизацию измерительной области с $600 \times 750 \times 600$ до $900 \times 1100 \times 900$ вокселей. В [12] проведены измерения в модели фронтального устройства камеры сгорания авиационного двигателя, работающего в обеднённом режиме. Вихревая форсунка устройства создавала закрученный турбулентный струйный поток с $Re = 50000$. Регистрация течения проводилась с помощью четырёх камер с разрешением 5,5 Мп с модернизированной чувствительной КМОП-матрицей для научных приложений. Хотя сравнительно низкая частота съёмки в 15 Гц не позволяла проследить динамику развития струйного течения, используемый в работе метод главных компонент дал возможность получить усреднённые по фазе 3D-поля скорости.

В данной работе исследовались возможности применения метода Томо PIV при диагностике струйных течений для измерительных объёмов с увеличенной глубиной до 40 мм. С расширением области использования метода Томо PIV на области с большей глубиной измерения наряду с недостатком света возникает целый ряд проблем, связанных с пределом оптической прозрачности, неопределённостью реконструкции по малому количеству проекций и увеличением числа артефактов реконструкции. Одна из целей предлагаемого исследования — получение пространственной структуры крупных вихрей в турбулентном струйном течении жидкости с закруткой потока. Предварительные результаты эксперимента опубликованы в обзорной работе по применению современных оптических методов для диагностики пространственной структуры турбулентных плазм [13].

Описание эксперимента. Установка представляла собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из рабочего объёма, насоса, термостата и расходомерной шайбы. Рабочей жидкостью служила вода при постоянной температуре, поддерживаемой с помощью термостата. Средний расход жидкости был постоянным при использовании насоса с обратной связью от расходомерной шайбы. Все исследования проводились в измерительном

объёме, изготовленном из оргстекла, размером $200 \times 200 \times 400$ мм. Объектом изучения являлась круглая затопленная турбулентная струя жидкости, образованная соплом диаметром $d = 15$ мм. Во время эксперимента анализировались как прямоточная, так и закрученная струи. Для закрутки потока применялся лопаточный завихритель с числом крутки $S = 1$, установленный внутри сопла, аналогичный использовавшемуся в работе [3]. Эксперимент проводился на режимах $Re = 10000$ и 30000 , что соответствовало среднерасходным скоростям $0,55$ и $1,7$ м/с.

Поток был засеян полиамидными частицами диаметром 20 мкм. Счётная концентрация частиц на проекциях N_{ppp} во время объёмных и плоскостных измерений равнялась $0,063$ и $0,047$ частиц/пиксель² или относительная концентрация частиц по площади $N_s = 0,45$ и $N_s = 0,33$ соответственно. Средний размер частиц на зарегистрированном изображении составлял 3 пикселя при параметрах оптической системы $M_0 = 0,17$, $f_{\#} = 16$, где M_0 — увеличение оптической системы, $f_{\#}$ — диафрагменное число.

Измерительные объёмы в методе Томо PIV зачастую имеют приплюснутую форму по глубине измерения, т. е. наименьшая сторона прямоугольного параллелепипеда соответствует глубине. Отношение наибольшей и наименьшей сторон составляет около одного порядка. Эксперименты с областью засветки большой толщины, в частности, цилиндрической формы описаны лишь в нескольких работах. Цилиндрическая область измерения диаметром $2,5d$ и высотой $4d$ регистрировалась четырьмя ПЗС-камерами «ВИДЕОСКАН-4021/П-2001» (расстояние между пикселями $7,4$ мкм) разрешением 4 Мп с объективами "Sigma 50 mm F/2.8 DG MACRO", их расположение показано на рис. 1. Для освещения области измерения использовался импульсный двухканальный Nd:YAG-лазер "EverGreen" фирмы "Quantel" мощностью 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 при одинаковых экспериментальных условиях. Переключение с объёмных измерений на плоскостные осуществлялось заменой оптики освещения. В плоскостных измерениях для освещения применялся лазерный нож толщиной 1 мм. Расчётная объёмная концентрация трассеров для томографического эксперимента составила $C \sim 1,13$ частиц/мм³. Перед проведением стереоскопического эксперимента концентрация частиц была увеличена путём добавления трассеров.

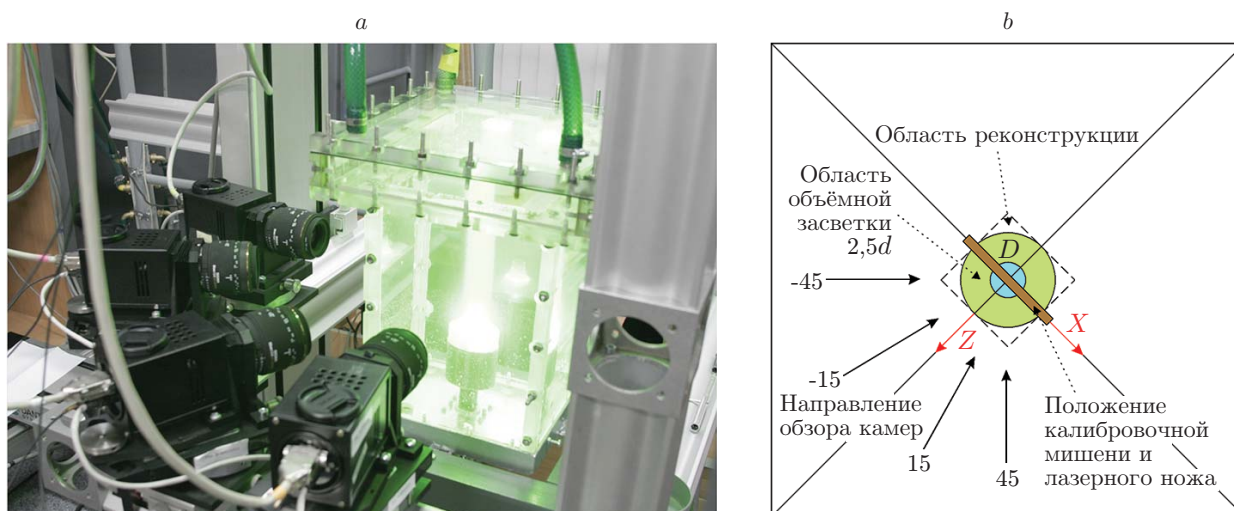


Рис. 1. Экспериментальный участок во время проведения измерений скорости в объёме турбулентной струи жидкости на выходе из сопла $d = 15$ мм: *a* — фотография участка, *b* — схема участка (вид сверху)

Калибровка камер оптической системы выполнялась по плоской калибровочной мишени с круглыми маркерами диаметром 1 мм, расположенными в узлах прямоугольной сетки с шагом 3 мм, нанесёнными на металлической пластине размером 80 × 80 мм. Мишень перемещалась по глубине на 25 мм координатным механизмом с микровинтом. Управление оборудованием и обработка данных осуществлялись посредством программного обеспечения ActualFlow, разработанного в Институте теплофизики СО РАН и позднее дополненного модулями для объёмных измерений.

Обработка данных. Результаты измерений методом Томо PIV обрабатывались высокопроизводительными гибридными CPU–GPU-алгоритмами. Для расчётов использовалась серверная станция с процессорами 2 × 16 AMD Opteron 6274, 2200 МГц (всего 32 ядра), ОЗУ 64 Гб и с установленным графическим процессором NVIDIA Tesla C2075.

Предварительная обработка проекций трассеров 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 пикселя. Остаточная невязка после трёх итераций самокалибровки была на уровне 0,2 пикселя. Для калибровки камер вычислялись параметры нелинейной модели камеры-обскуры с дисторсией.

В данной работе проведено сравнение результатов расчёта проверенного временем стереоскопического метода измерения скорости Stereo PIV [14] с результатами томографии для оценки качества получаемых измерений в объёме. Для обоих методов использовалась одна и та же калибровка оптической системы, но разные проекционные данные с объёмной и плоской засветкой соответственно.

Число векторов в 3D-поле скорости для прямоточной струи составило 36 × 52 × 36 с разрешением 1,92 мм на вектор скорости. Реконструируемый измерительный объём имел линейные размеры 40 × 52 × 40 мм и был дискретизирован на 896 × 1295 × 896 вокселей. Уровень дискретизации измерительного объёма эквивалентен дискретизации зарегистрированных проекций. Объём по ширине и глубине был фиксированным и связан с поперечным размером струйного течения. Высота реконструируемого объёма ограничена количеством доступной памяти GPU-устройства в 4,2 Гб.

Для томографической реконструкции прямоточной струи применялся алгоритм на основе метода МТЕ [9] в целях 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 освещённых частиц со скоростями, близкими к нулевым, и расположенных в обширной внешней области струи. Алгоритм МТЕ требует в 4 раза больше оперативной памяти, чем необходимо для стандартной реконструкции (в данном случае 16,8 Гб), и в 3,5 раза больше расчётного времени. Было использовано три итерации МТЕ, в каждой из которых применялось по 10 итераций реконструкции SMART (Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique). Начальная оценка интенсивности в объёме проводилась простым мультипликативным методом MLOS (Multiplicative Line-of-Sight). Что касается корреляционного алгоритма, то применялся итерационный метод с непрерывным смещением элементарных объёмов и поэтапным дроблением расчётной сетки вдвое. Конечный размер элементарного объёма равен 48^3 вокселей на трёхмерной сетке с 50 %-ным перекрытием. Время реконструкции пары объёмов алгоритмом МТЕ равнялось 21 мин, а время корреляционного алгоритма — 16 мин, т. е. 37 мин для расчёта одного поля скорости и около двух недель для набора статистики в 500 измерений.

Число векторов в томографическом поле скорости для закрученной струи составило 54 × 41 × 54 с разрешением 1,5 мм на вектор скорости и расстоянием 0,75 мм между соседними векторами. Реконструируемый измерительный объём имел линейные размеры 40 × 31 × 40 мм и был дискретизирован на 1100 × 850 × 1100 вокселей. В данном случае

геометрия объёма отличалась от прямоточной струи вследствие того, что при наличии закрутки струя расширялась в поперечном направлении и основные структурные особенности проявлялись вблизи сопла на расстоянии от 0,5 до 1 калибра. Для томографической реконструкции закрученного течения подавление артефактов реконструкции по методу МТЕ не привело к существенному улучшению данных, поэтому использовалось только 10 итераций алгоритма SMART. Трёхмерная расчётная сетка состояла из элементарных объёмов с конечным размером 40^3 вокселей с 50 %-ным перекрытием.

Для уменьшения ошибки, связанной с расчётом производных по полученным данным на регулярной сетке, к исходному полю скорости предварительно применялся изотропный трёхмерный гауссов фильтр размером $5 \times 5 \times 5$ векторов. Ширина фильтра на полувысоте равнялась удвоенному размеру расчётной области. Отфильтрованные ошибочные векторы в исходном поле скорости не рассматривались. Для анализа локализации крупных вихрей рассчитывались Q - и λ_2 -критерии на базе полного тензора градиента скорости в каждой точке расчётной сетки.

Обсуждение результатов. На рис. 2 дано сравнение полученных полей скорости в центральной плоскости, а на рис. 3 приведены профили продольной компоненты средней скорости. Причём на оси струи разница составляет менее 0,1 % от среднерасходной V_b , что согласуется с теоретической оценкой погрешности измерения в 0,2 % и является хорошим результатом. Разница оценки скорости в области слоя смещения составляет 10 % от V_b .

На рис. 4 показаны результаты сравнения распределений средней скорости в сечении вдоль оси закрученной струи. Визуально результаты томографических измерений содержат больше шума. Это связано в первую очередь с меньшим объёмом данных, использованных для расчёта средних характеристик, а также с принципиально бóльшим уровнем случайной погрешности объёмных измерений по сравнению с плоскостными измерениями. Количественные значения расхождения составили 8,2 % от V_b для продольной компоненты и 7,9 % от V_b для азимутальной компоненты средней скорости. Таким образом, объёмная структура закрученного потока восстанавливается корректно, визуализируются основные особенности течения в виде распада вихря, зоны обратного течения.

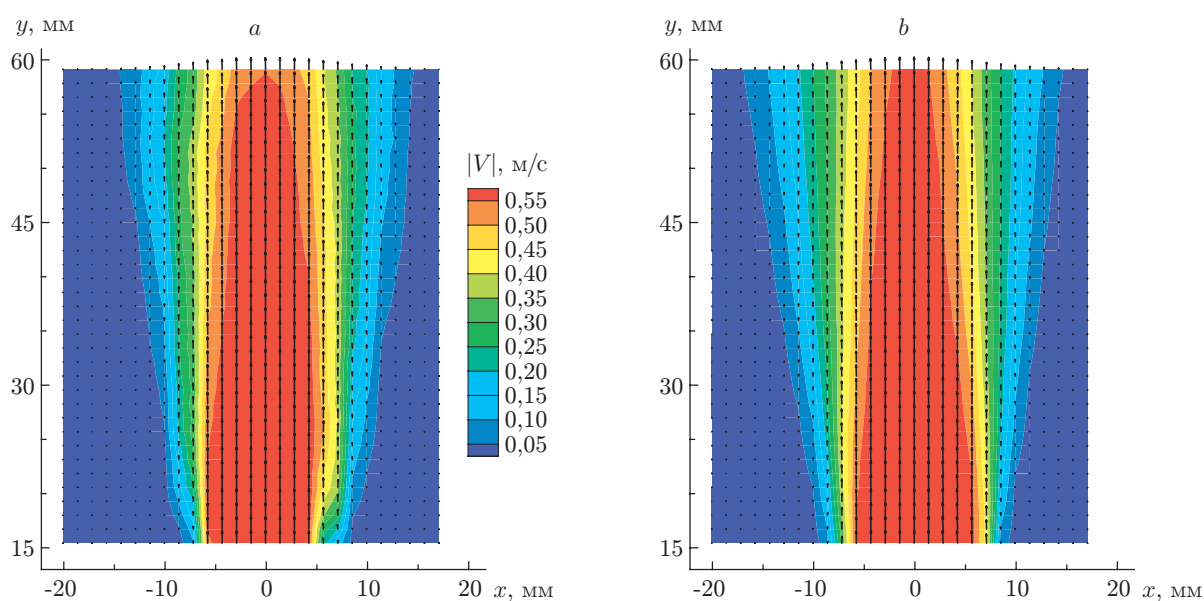


Рис. 2. Сравнение результатов измерения распределения модуля средней скорости в сечении вдоль оси прямоточной струи ($Re = 10000$): методом Томо PIV (a) и методом Stereo PIV (b) (получено из 500 и 1000 полей скорости соответственно)

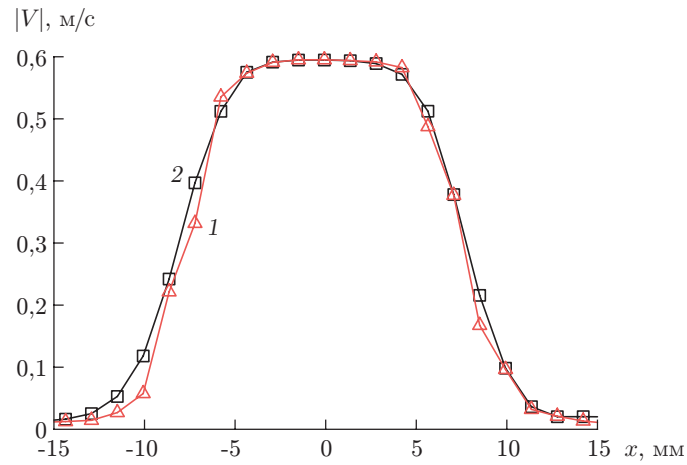


Рис. 3. Сравнение профилей вертикальной компоненты средней скорости, полученных методами Томо PIV (кривая 1) и Stereo PIV (кривая 2) в сечении $z = 0$, $y = 2d$ прямоугольной струи из 500 и 1000 полей скорости соответственно ($Re = 10000$)

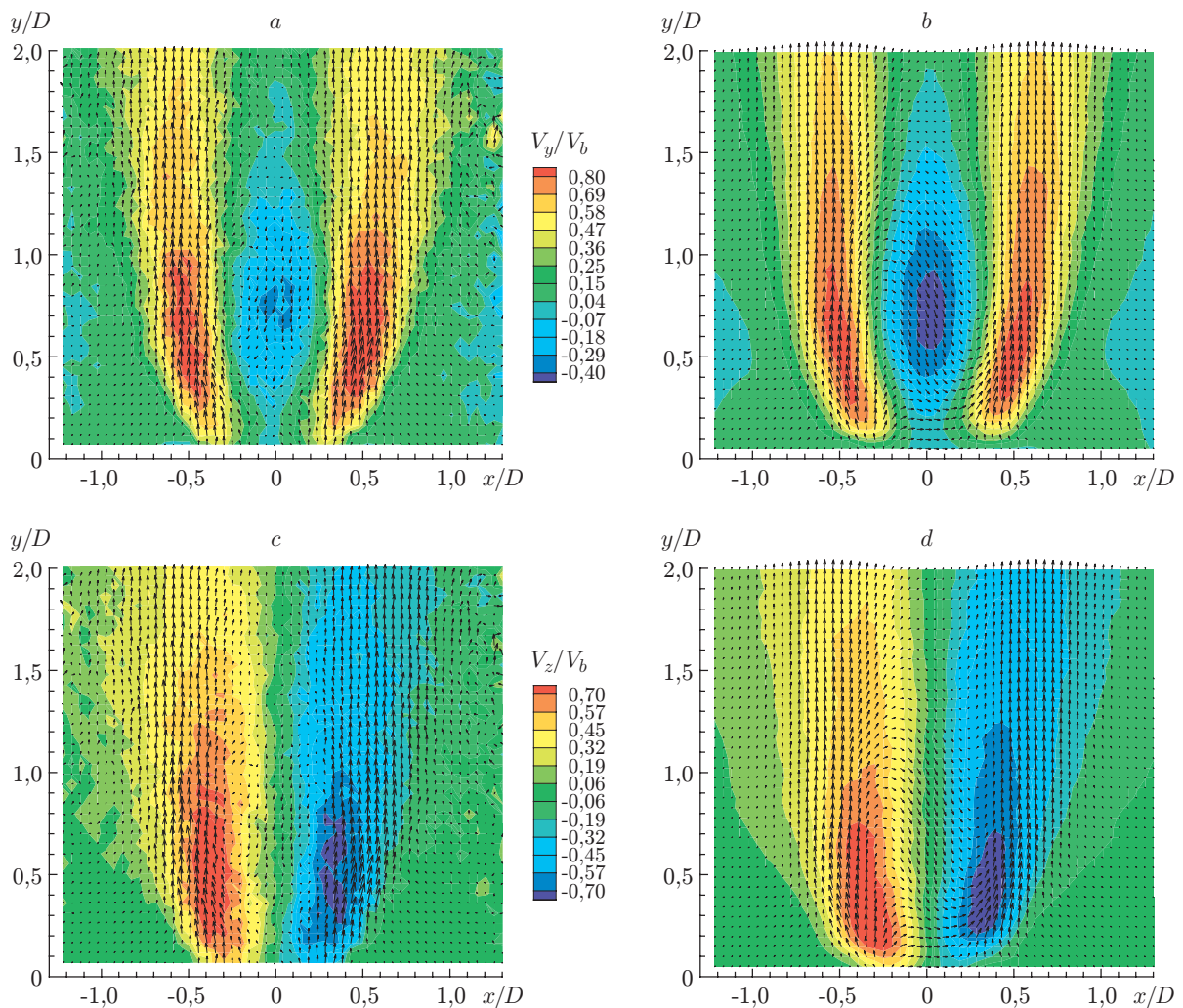


Рис. 4. Сравнение распределений компонент скорости: средней продольной (a, b) и средней азимутальной (c, d), полученных в центральной плоскости методами Томо PIV (a, c) и Stereo PIV (b, d) для закрученной турбулентной струи ($S = 1$, $Re = 30000$). Статистика рассчитывалась из 100 и 350 мгновенных полей скорости соответственно

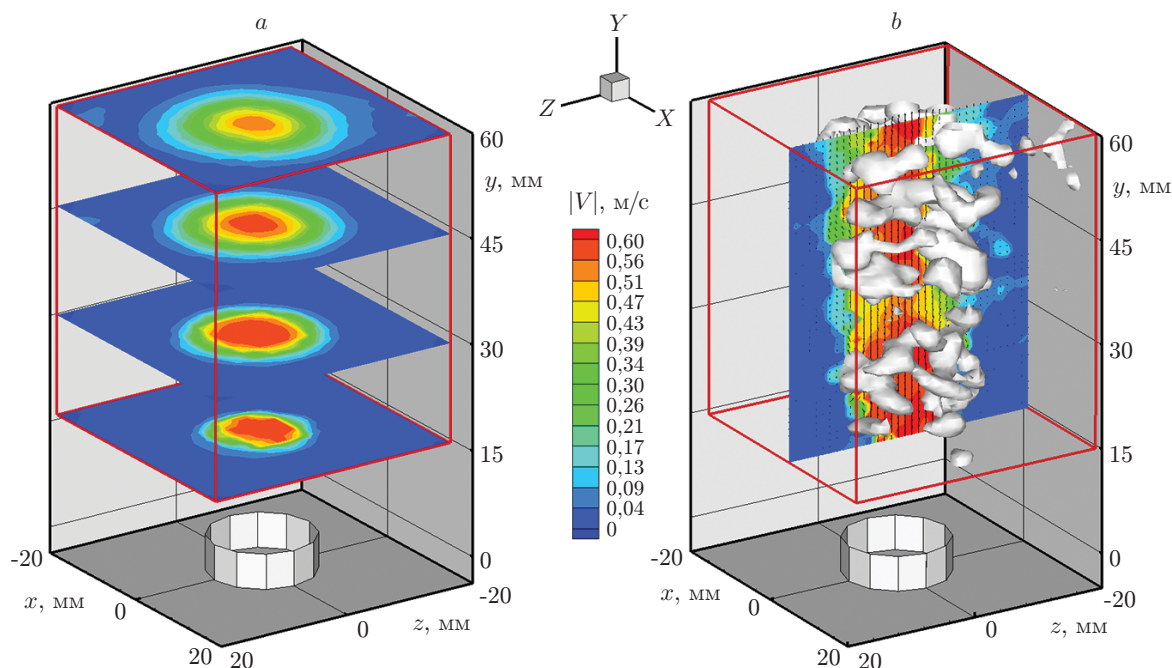


Рис. 5. Экспериментальные данные пространственных распределений статистических характеристик в турбулентной прямоочной струе ($Re = 10000$), полученные осреднением из 500 измерений: в горизонтальных сечениях цветом показан модуль средней скорости (a), в вертикальном сечении — мгновенное распределение скорости (b). Изоповерхности обозначают локализацию вихрей по Q -критерию

На рис. 5, a приведено пространственное распределение модуля средней скорости в нескольких сечениях поперёк струи $y/d = 1, 2, 3, 4$. Визуализируется постепенное расширение струи и уменьшение скорости на оси. Уровень пульсации вертикальной скорости в слое смешения струи составил около 25 % от среднерасходной скорости, что согласуется с аналогичными плоскостными измерениями в работе [3]. На распределении средней скорости (см. рис. 5, a) наблюдается осевая симметрия с отчётливыми концентрическими изолиниями представленных величин в поперечных сечениях. На рис. 5, b дан 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, начиная с $y/d = 2,5$, визуализируется попарное объединение и дальнейший распад кольцевых вихрей, сформировавшихся в сдвиговом слое вблизи сопла за счёт роста неустойчивости Кельвина — Гельмгольца.

На рис. 6 представлен результат оценки стационарного распределения скорости в измерительном объёме для сильно закрученной струи. Рис. 6, a демонстрирует трёхмерное поле средней скорости в целом, где цветом обозначена величина модуля средней скорости. На рис. 6, b цветом изображена вертикальная компонента скорости в поперечном сечении и на линиях тока. Винтовые линии тока демонстрируют наличие закрутки. Замкнутая кривая тока на оси соответствует локализации зоны рециркуляции.

На рис. 7 изоповерхности значений, рассчитанных по критерию λ_2 , визуализируют спиральные вихри для мгновенной картины течения. В целом проведённый анализ 100 полей скорости показал, что фазово-осреднённая 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. Наиболее важно, что метод Томо PIV позволяет измерять поля именно мгновенной скорости и, следовательно, анализировать структуру действи-

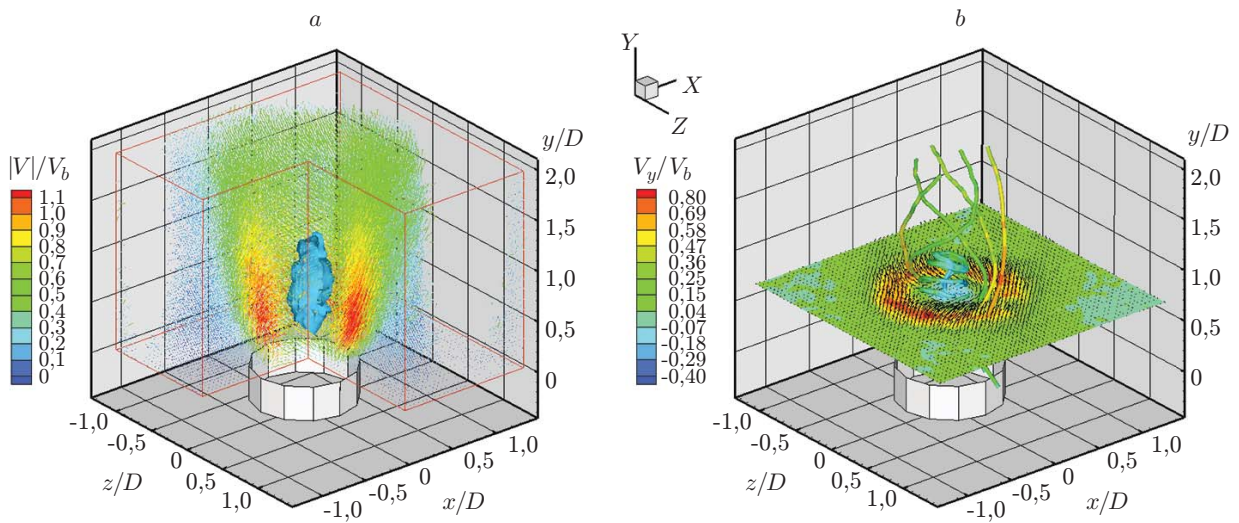


Рис. 6. Экспериментальные данные пространственных распределений, полученные в турбулентной закрученной струе ($Re = 30000$): нормированный модуль средней скорости (a) и поперечное сечение $y/d = 0,6$ вертикальной компоненты средней скорости (b). Показаны изоповерхность нормированной вертикальной компоненты средней скорости $V_y/V_b = -0,1$ и её значение на линиях тока

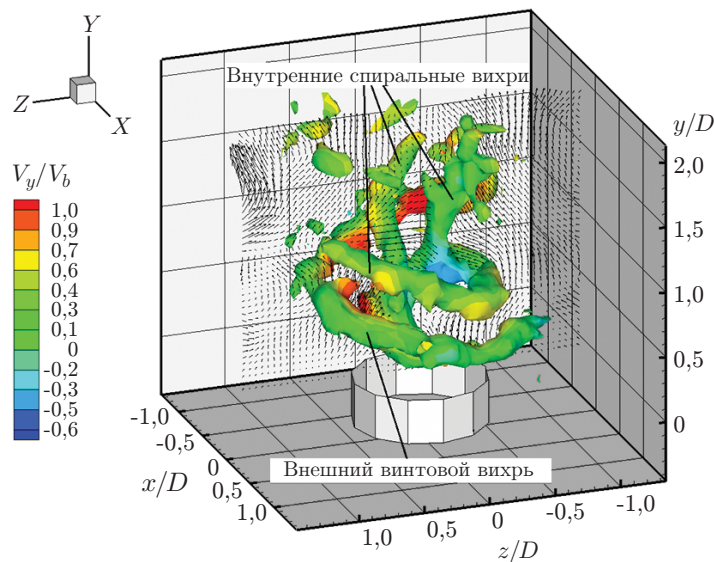


Рис. 7. Пространственное распределение нормированной мгновенной скорости в вертикальном сечении $x/d = 0$, цвет обозначает продольную компоненту скорости, изоповерхности уровня $-3,8$ показывают локализацию вихрей по нормированному λ_2 -критерию для закрученной турбулентной струи ($Re = 30000$, размер поля $54 \times 41 \times 54$ векторов)

тельно присутствовавших в потоке вихрей (в отличие от фазово-осреднённых структур). Таким образом, видим, что вследствие наличия зоны обратного течения в струе присутствует также внутренний сдвиговый слой, в котором образуются спиральные вихри меньшего размера.

Погрешность оценки трёхмерных распределений скорости в закрученной струе можно выразить следующим образом. Полуширина симметричных относительно нуля распределений поперечных компонент смещения vx , vz составляла около 10 вокселей. Гистограмма распределения продольной компоненты смещения частиц vy была несимметричной и сдвинута в сторону положительных значений со средним значением 1,3 вокселя, типичными положительными значениями в области ядра струи около 5 вокселей и отрицательными в центре зоны рециркуляции $-1,5$ вокселя. Типичная величина абсолютной ошибки оценки мгновенного смещения составила около 0,3 вокселя [6], 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 %.

Заключение. В данной работе описано применение метода малоракурсной томографии на основе анемометрии по изображениям частиц (Томо PIV) для измерения 3D-полей скорости в турбулентных струйных течениях. Проведены экспериментальные исследования прямоточной и сильно закрученной струи, вытекающей из сопла $d = 15$ мм, в цилиндрической области диаметром $2,5d$ и длиной $4d$, начиная с кромки сопла. Проекция области измерения потока регистрировалась камерами с разрешением 4 Мп, что позволило выполнить томографическую реконструкцию с высоким пространственным разрешением до $54 \times 41 \times 54$ векторов скорости и потребовало использования производительных гибридных CPU-GPU-алгоритмов обработки данных.

Проведение измерений методом Томо PIV в объёме с увеличенной глубиной до 40 мм связано с рядом трудностей: недостаток света от стандартных импульсных PIV-лазеров, высокая концентрация частиц на проекциях, предел оптической прозрачности потока, а также рост числа артефактов реконструкции. В данной работе с большинством этих проблем удалось справиться. Для подавления влияния артефактов реконструкции использован известный эффективный алгоритм МТЕ.

В целях контроля качества томографических измерений во время эксперимента проекции записывались в режиме плоской или объёмной засветки. Результаты объёмных измерений сравнивались с результатами оценки скорости, полученной методом Stereo PIV. Плоскостные и объёмные измерения выполнялись в разные моменты времени, поэтому возможно сравнение только статистических характеристик. Анализ показал совпадение средних распределений скорости в плоскости на уровне 0,1 % от среднерасходной в ядре струи и около 10 % вблизи слоя смещения для прямоточной струи. Совпадение средней скорости в центральном сечении для закрученной струи находилось на уровне 8 % от среднерасходной скорости.

Полученные стационарные распределения скорости для струйных течений без закрутки и с закруткой обладают осевой симметрией. Для прямоточной струи удалось достичь того же уровня 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 трёхмерные структуры спиральных вихрей в закрученной струе. Визуализирована трёхмерная структура зоны рециркуляции в потоке с закруткой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. М.: Наука, 1984. 716 с.

2. **Weisgraber T. H., Liepmann D.** Turbulent structure during transition to self-similarity in a round jet // *Exp. Fluids*. 1998. **24**, Is. 3. P. 210–224.
3. **Alekseenko S. V., Dulin V. M., Kozorezov Yu. S. et al.** Effect of axisymmetric forcing on structure of a swirling turbulent jet // *Intern. Journ. Heat and Fluid Flow*. 2008. **29**, Is. 6. P. 1699–1715.
4. **Elsinga G. E., Scarano F., Wieneke B. et al.** Tomographic particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2006. **41**, Is. 6. P. 933–947.
5. **Scarano F.** Tomographic PIV: principles and practice // *Meas. Sci. Technol.* 2013. **24**, Is. 1. 012001.
6. **Бильский А. В., Ложкин В. А., Маркович Д. М. и др.** Оптимизация и тестирование томографического метода измерения скорости в объёме потока // *Теплофизика и аэромеханика*. 2011. **18**, № 4. С. 555–566.
7. **Elsinga G. E., Westerweel J., Scarano F. et al.** On the velocity of ghost particles and the bias errors in Tomographic-PIV // *Exp. Fluids*. 2011. **50**, Is. 4. P. 825–838.
8. **Michaelis D., Novara M., Scarano F. et al.** Comparison of volume reconstruction techniques at different particle densities // *Proc. of the 15th Intern. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*. Lisbon, Portugal, 5–8 July, 2010. URL: http://ltces.dem.ist.utl.pt/lxllaser/lxllaser2010/upload/1708_toytpv_3.10.5.Full_1708.pdf (дата обращения: 19.09.2013).
9. **Novara M., Batenburg K. J., Scarano F. et al.** Motion tracking-enhanced MART for tomographic PIV // *Meas. Sci. Technol.* 2010. **21**, Is. 3. 035401.
10. **Violato D., Scarano F.** Three-dimensional evolution of flow structures in transitional circular and chevron jets // *Phys. Fluids*. 2011. **23**, Is. 12. 124104.
11. **Violato D., Ianiro A., Cardone G. et al.** Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets // *Intern. Journ. Heat and Fluid Flow*. 2012. **37**. P. 22–36.
12. **Ceglia G., Discetti S., Ianiro A. et al.** Three-dimensional organization of the flow structure in a non-reactive model aero engine lean burn injection system // *Exp. Therm. and Fluid Sci.* 2014. **52**. P. 164–173.
13. **Дулин В. М., Маркович Д. М., Токарев М. П., Чикишев Л. М.** Применение современных оптических методов для диагностики пространственной структуры турбулентных пламён // *Автометрия*. 2012. **48**, № 3. С. 22–32.
14. **Маркович Д. М., Токарев М. П.** Алгоритмы реконструкции трехкомпонентного поля скорости в методе Stereo PIV // *Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии*. 2008. **9**, № 1. С. 311–326.

Поступила в редакцию 19 сентября 2013 г.
