



УДК 532.57:533.6.08:519.6

А.В. Бильский<sup>1</sup>, В.А. Ложкин<sup>2</sup>, Д.М. Маркович<sup>1,2</sup>, М.П. Токарев<sup>1</sup>, М.В. Шестаков<sup>1</sup>

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

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

## ПРИМЕНЕНИЕ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА

*Рассматривается бесконтактный метод измерения полей скорости в объеме потока для гидроаэродинамического эксперимента на основе оптической томографии. Суть метода состоит в измерении перемещения трассерных частиц в измерительном объеме потока за короткое время между вспышками лазера. Основным отличием томографического метода измерения (Томо PIV – Tomographic Particle Image Velocimetry) от стандартного метода цифровой трассерной визуализации (PIV) является этап томографической реконструкции объемного изображения. Одной из существенных проблем, сдерживающих широкое распространение данного метода в настоящее время, является высокая ресурсоемкость Томо PIV алгоритмов по затрачиваемому времени обработки, необходимому объему дисковой и оперативной памяти.*

*Авторами работы были реализованы программные алгоритмы для обработки экспериментальных данных, полученных с использованием томографической цифровой трассерной визуализации. В работе также проведено исследование точности томографической реконструкции и ошибки определения смещения частиц по модельным искусственным изображениям. Описанный томографический метод оценки поля скорости в объеме потока был применен для диагностики турбулентной затопленной струи, вытекающей в узкий канал. Применение разработанных подходов в эксперименте позволило получить пространственное распределение трехмерных трехкомпонентных мгновенных полей скорости и среднее поле скорости в измерительном объеме потока.*

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ В ОБЪЕМЕ ПОТОКА, ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ,  
ПЛОСКАЯ СТРУЯ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Томографический метод цифровой трассерной визуализации Томо PIV (Tomographic Particle Image Velocimetry) [1] используется для измерения скорости в объеме потока в гидроаэродинамическом эксперименте. В отличие от стереоскопического метода цифровой трассерной визуализации Stereo PIV, являющегося в настоящее время практически стандартизованным инструментом диагностики потоков [2 – 3], где три компоненты скорости измеряются в плоском сечении потока, метод ТомоPIV, наряду с несколькими другими подходами, позволяет измерять мгновенные распределения трех компонент скорости в объеме течения. Суть метода состоит в следующем. В исследуемое течение добавляются трассеры. Поток, подобно традиционным PIV методам, дважды, с контролируемой временной задержкой, освещаются лазерным импульсом. При этом область освещения не является локализованной в плоскости. Рассеянный свет от частиц регистрируется на три или более цифровые камеры, ориентированные под различными

направлениями к области измерения. На фотоматрицу цифровой камеры проецируется распределение света, рассеянного частицами в данном направлении. Истинные положения трассеров в измерительном объеме потока восстанавливаются методами томографической реконструкции по полученным изображениям частиц с использованием информации о пространственной калибровке камер. Мгновенная картина течения оценивается по смещениям частиц за время между вспышками лазера, которые рассчитываются посредством корреляции реконструированных объемных изображений трассеров.

Альтернативными методами получения трехкомпонентной трехмерной картины поля течения являются Holographic PIV [4], Scanning PIV [5] и 3D PTV [6]. Последний метод, 3D PTV (Particle Tracking Velocimetry), по принципу действия наиболее близок к томографической цифровой трассерной визуализации. Однако этот метод требует поддержания сравнительно низкой концентрации трассеров для успешной идентификации отдельных частиц на всех проекциях путем триангуляции и отслеживания их перемещения для оценки скорости.

Применение метода Томо PIV позволяет получать наиболее полную информацию о структуре изучаемого течения, по сравнению со стандартными плоскостными методами исследования PIV, Stereo PIV. Так, на основе полученных экспериментальных данных можно рассчитать все компоненты тензора турбулентных напряжений (Рейнольдса) и тензора градиента скорости, что может быть использовано для анализа процессов переноса турбулентной кинетической энергии и поведения вихревых структур в потоке.

Перечислим некоторые известные сложности Томо PIV измерений.

Во-первых, концентрация частиц в области измерения должна быть достаточной для получения хорошего пространственного разрешения оценки скорости. С другой стороны она не должна превышать критического значения  $\sim 0,2$  частиц/пикс, выше которого томографическая реконструкция существенно затрудняется вследствие затенения частицами друг друга и появления ложных образов трассеров в реконструированном объеме [7].

Следующая проблема связана с необходимостью высокоточной калибровки системы камер. Точность должна быть порядка 0,1 пикс, что довольно сложно выполнить, применяя стандартные фотограмметрические подходы для калибровки камер. Решением данной проблемы является использование подхода «самокалибровки» системы камер по непосредственно зарегистрированным изображениям частиц [8].

Одной из существенных проблем, сдерживающих широкое распространение данного метода в настоящее время, является высокая ресурсоемкость Томо PIV алгоритмов. Время расчета одного поля скорости составляет от 30 – 60 минут при обработке данных, полученных с использованием камер с размером матрицы 1 Мпикс, на компьютере с процессором Intel Core2Duo с 3 гигабайтами ОЗУ. Данной проблеме посвящено несколько работ [7], [9 – 10], где рассматривались различные алгебраические методы томографической реконструкции, а также варианты оценки начального распределения интенсивности для уменьшения времени сходимости алгоритма реконструкции. Математический аппарат вычислительной томографии изложен в монографиях [11 – 12].

Известные на сегодняшний день в литературе факты применения метода Томо PIV для экспериментальной гидроаэродинамики крайне ограничены и насчитывают единицы работ: эксперименты по изучению когерентных структур в пограничном турбулентном слое [13], изучение обтекания конечного цилиндра, закрепленного на плоскости [14], анализ трехмерных вихревых структур в сносящем потоке [15].

Целью данной работы является тестирование Томо PIV алгоритмов на синтетических данных, и применение метода для измерения трехкомпонентных полей скорости в каноническом эксперименте – распространение турбулентной струи в щелевом зазоре.

Течение струи в узком канале обладает рядом особенностей, существенно отличающих ее от свободных струй и течений в каналах. В силу плоской геометрии течения в потоке начинают проявляться свойства двумерной турбулентности. Отличительная черта двумерной турбулентности – это наличие в потоке крупномасштабных когерентных вихревых структур,

линейный размер которых на порядки превышает поперечный размер течения. В работах [16 – 17] исследовалось истечение турбулентной струи в ячейке Хил – Шоу. Авторы данной работы указывают на трехмерные явления в потоке, но никаких качественных и количественных данных не представляют. Анализируя эти работы, можно сделать следующие выводы: полученные с помощью локальных методов данные не дают полной картины течения и не могут содержать информации о трехмерных структурах. Тем самым вопрос о формировании, развитии и разрушении вторичных потоков остается открытым. Учитывая столь сложную пространственную структуру потока, необходимо развивать и использовать методы, которые позволяют получить пространственные распределения скорости в потоке [18].

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ СКОРОСТИ

Иллюстрация принципов работы алгоритма, используемого для получения поля скоростей в измерительном объеме потока, показано на рис. 1. Метод состоит из трех шагов: калибровка оптической системы, томографическая реконструкция и корреляционная обработка восстановленных объемных изображений частиц.

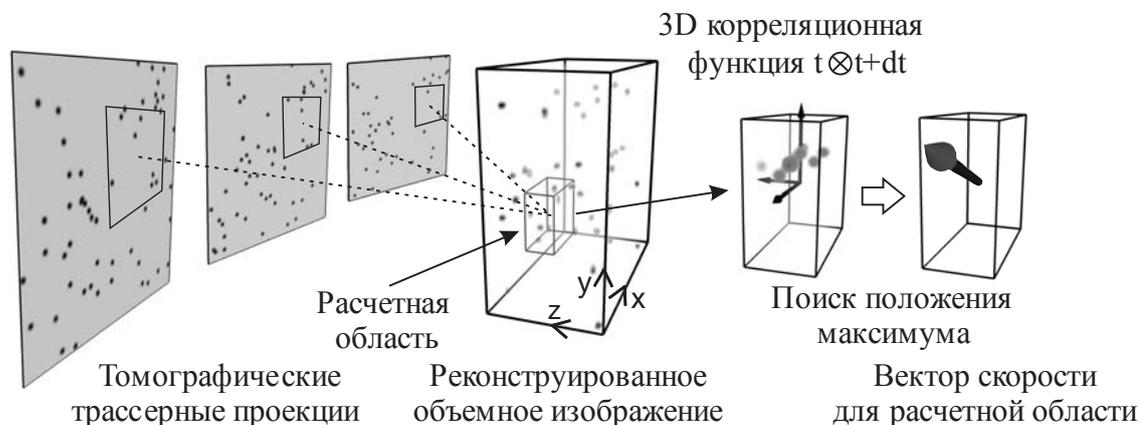


Рис. 1. Иллюстрация принципов работы алгоритма оценки поля скорости в методе Томо PIV

Калибровка оптической системы состоит из геометрической калибровки всех камер, используемых для регистрации области потока. В процессе калибровки камеры определяются параметры ее модели, которая связывает координаты точек в области измерения с координатами этих точек в плоскости изображения. В данной работе использовалась модель камеры стеноп (pinhole), расширенная с учетом нелинейных искажений оптики в виде радиальной и тангенциальной дисторсии. Параметры модели камеры оценивались путем нелинейной оптимизации второго порядка алгоритмом Левенберга-Марквардта. Типичное значение ошибки калибровки камер составляло 0,5 – 0,8 пикс.

Дополнительно для уточнения моделей камер применялся метод самокалибровки по зарегистрированным экспериментальным изображениям частиц [8]. Данная процедура увеличивает точность сведения линий наблюдения произвольной точки внутри измерительной области с разных ракурсов до 0,05 – 0,1 пикс. Такая высокая точность согласования моделей камер уменьшает ошибку реконструкции объемной области потока с трассерами и позволяет получить более надежную оценку поля скорости исследуемого течения, так как типичный диаметр частицы на зарегистрированном изображении составляет 2 пикс. Также данная процедура позволяет обнаружить возможную разъюстировку оптической системы во время эксперимента.

Основным шагом получения поля скорости в методе Томо PIV является восстановление трехмерного распределения интенсивности алгоритмом итерационной алгебраической реконструкции (рис. 1). Задача томографической реконструкции является

некорректной (или условно корректной) и сводится к задаче решения сильно недоопределенной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (1), для решения которой известно несколько итерационных методов. На данный момент для задачи реконструкции объемного поля образов частиц малого размера по ограниченному числу ракурсов наиболее эффективным методом по совокупности показателей (скорости сходимости и точности реконструкции и др.) считается модификация мультипликативного алгебраического алгоритма реконструкции SMART (Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) с оценкой начального распределения по схеме MLOS (Multiplicative Line Of Sight) [10].

Принцип итерационного алгебраического метода томографической реконструкции заключается в итерационном уточнении интенсивности в каждом элементе (вокселе) реконструируемого объема  $f_j^{k+1}$  с учетом интенсивности каждого пикселя  $p_i$  на зарегистрированных изображениях-проекциях:

$$W_{ij}f_j = p_i \quad (1)$$

$$f_j^{k+1} = f_j^k \prod_i^{N_j} \left[ \left( \frac{p_i}{\sum_{l \in L_i} W_{il} f_l^k} \right)^{\mu W_{ij}} \right]^{1/N_j} \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент релаксации,  $W_{ij}$  – разреженная весовая матрица, учитывающая вклад интенсивности  $j$ -го вокселя в интенсивность  $i$ -го пикселя,  $N_j$  – количество пикселей, на которые спроецирован  $j$ -ый воксель,  $L_i$  – множество вокселей, участвующих в формировании изображения  $i$ -го пикселя.

Заключительным шагом Томо PIV алгоритма является корреляционный анализ полученных пар объемных изображений частиц для оценки поля скорости (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.

## ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ

В работе исследовалась точность процедуры томографической реконструкции, а также точность Томо PIV алгоритма оценки поля скорости в целом. Оценка точности томографической реконструкции проводилась по величине корреляции рассчитанного объемного распределения интенсивности, восстановленного по искусственно созданным проекциям, с известным объемным распределением интенсивности  $Q$  [1, 10]:

$$Q = \sum_j (I_j^{rec} * I_j^{synth}) / \sqrt{\sum_j (I_j^{rec})^2 * \sum_j (I_j^{synth})^2} \quad (3)$$

Для определения точности оценки скорости в качестве критерия использовалось значение среднеквадратичного отклонения между точным и рассчитанным значением скорости (полной ошибки по полю скорости):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (u_{0i} - u_i)^2}, \quad (4)$$

где  $u_{0i}$  – истинное значение скорости и  $u_i$  – рассчитанное значение скорости для  $i$ -го узла в рассматриваемом поле скорости. При этом пары синтетических изображений частиц моделировали синусоидальное распределение смещения частиц с ненулевой компонентой по оси  $y$ :  $V(Z, X) = V_0 \cdot 2w / w_{img} (Z + d) / d \sin(2\pi X/w)$  заданное аналитически. Здесь  $(X, Y, Z)$  обозначают координаты точки в миллиметрах в области измерения. Физические размеры области измерения выбраны  $2w \times 2w \times 2d = 20 \times 20 \times 5$  мм с началом координат в центре области. Таким образом, период гармонической функции равнялся половине ширины измерительной области  $w$ , а по глубине моделировался линейный градиент смещения частиц с максимальной величиной амплитуды смещения в плоскости  $Z = 0$  равной  $V_0 = 2,3$  вокс. Для задачи тестирования было создано несколько наборов синтетических изображений частиц, моделирующих оптические проекции области исследования для Tomo PIV измерений, с различной концентрацией трассеров в исследуемой области  $N_{ppp}$ , которая изменялась в пределах от 0,01 до 0,5 част/пикс. Камеры в модели располагались крестообразно: сверху, снизу, справа и слева. Направление ракурса наблюдения камер выбрано оптимальным [1919] и составляло  $(\theta, \varphi) = (60, 60)$  градусов. Здесь азимутальный угол наблюдения  $\varphi$  отсчитывался между проекцией оптической оси камеры и осью  $y$  (рис. 1), полярный угол наблюдения  $\theta$  отсчитывался между оптической осью камеры и осью  $x$  (рис. 1). Диаметр частиц на изображении по уровню интенсивности  $\exp^{-2}$  составлял 2,5 пикс. При моделировании изображений расстояние до объекта было выбрано 200 мм, фокусное расстояние оптики 10 мм. Размер светочувствительной матрицы камеры равнялся  $w_{img} \times w_{img} = 256 \times 256$  пикс, линейный размер пикселя составлял 1/256 мм. Линейные размеры реконструированной трехмерной области измерения составляли  $256 \times 256 \times 64$  вокс. Размер элементарной расчетной области для корреляционного анализа составлял  $32 \times 32 \times 16$  вокс. Элементарные области располагались в измерительном объеме с пространственным перекрытием 50%, давая общее количество векторов по координатным осям  $15 \times 15 \times 7$ . Ниже значение полной ошибки определения перемещения частиц указано в вокселях, а не миллиметрах для того, чтобы сделать полученную оценку точности алгоритма более универсальной и не привязываться к конкретным размерам измерительной области. В ходе тестирования сравнивались два алгоритма томографической реконструкции: только быстрая оценка интенсивности в объеме (MLOS) и быстрая оценка интенсивности совместно с итерационным алгоритмом (SMART). Также приведены данные для случая без реконструкции изображения по проекциям, когда необходимая для расчета поля скорости интенсивность частиц в объеме моделировалась напрямую.

На рис. 2 (а), (б) показаны зависимости значения коэффициента корреляции  $Q$  и величины полной ошибки оценки смещения частиц  $\delta$  от величины концентрации трассеров в измерительном объеме. По результатам тестирования определено оптимальное количество SMART итераций  $I = 15$ . В результате тестирования на указанных синтетических изображениях показано, что разброс значений полной ошибки смещения трассеров для различных параметров достаточно велик:  $\delta = 0,3 - 1,3$  вокс, что говорит о важности правильного подбора параметров, как самого эксперимента, так и параметров обработки данных. На рис. 2, (а) представлена зависимость точности реконструкции ( $Q$ ) от значения концентрации трассеров. На основе полученной зависимости определено оптимальное значение концентрации частиц равное  $N_{ppp} = 0,08$  част/пикс.

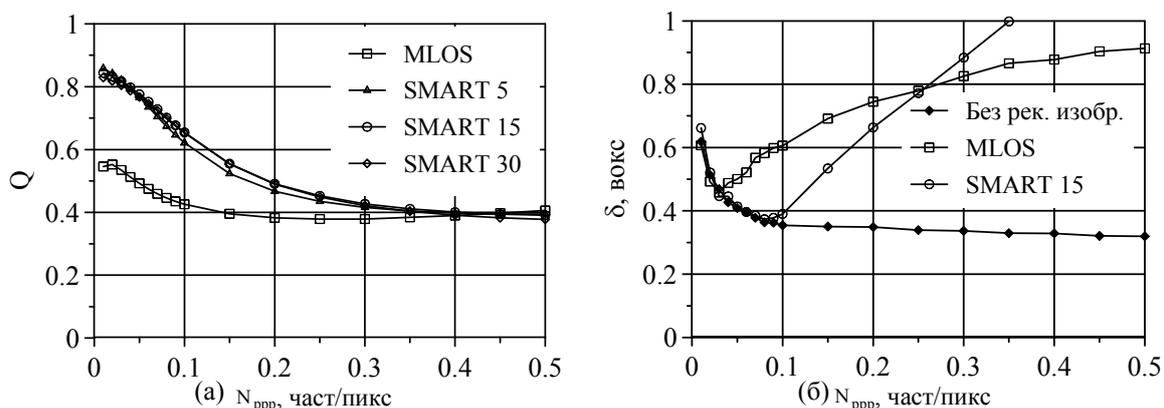


Рис. 2. Зависимости точности томографической реконструкции (а) и полной ошибки оценки смещения частиц (б) от величины концентрации частиц

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Описанные выше подходы были применены в эксперименте для измерения полей скорости турбулентной затопленной струи, вытекающей в узкий канал. Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 3. Экспериментальный стенд представляет собой замкнутый гидродинамический контур, состоящий из бака, насоса, расходомера (ротаметра) и рабочего участка. Рабочим участком был узкий канал, образованный двумя окнами из оргстекла (размером 307 на 270 мм<sup>2</sup> и толщиной 40 мм) расположенными на расстоянии  $H$  друг от друга. Эксперимент проводился для двух чисел Рейнольдса:  $Re = 2HU_0/\nu = \{10000, 20000\}$ , где  $U_0$  – среднерасходная скорость,  $H = 4$  мм – глубина канала и трех измерительных областей размером  $40 \times 30 \times 4$  мм<sup>2</sup> начиная от верхней кромки сопла (рис. 4). Сопло было образовано двумя плоскими вставками, изготовленными по профилю Витошинского, ширина сопла  $d$  составляла 10 мм, длина прямого участка сопла 20 мм.

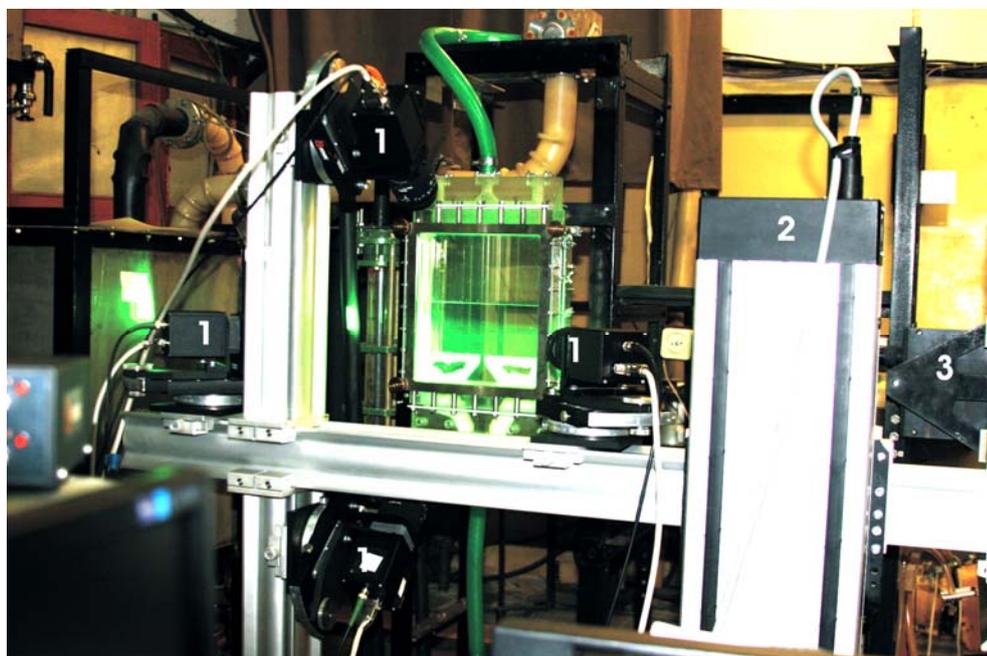


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки. 1 – цифровые ПЗС камеры, 2 – моторизованная координатная система, 3 – Nd: YAG лазер

Для измерения полей мгновенной скорости использовалась измерительная система «ПОЛИС», состоящая из сдвоенного импульсного лазера Nd: YAG (50 мДж в импульсе длительностью 10 нс), четырех ПЗС камер (1360×1024 пикс, 8 бит) и синхронизирующего

процессора. Управление оборудованием и обработка данных осуществлялась посредством программного обеспечения «ActualFlow». Толщина лазерного ножа составляла 5 мм, таким образом, вся область течения была освещена. В оптической системе применялись объективы Nikon с фокусным расстоянием 50 мм. Поток засеивался полиамидными трассерами диаметром 20 мкм. Средняя концентрация частиц на проекции составляла около 0,04 част/пикс. Для каждого режима течения набиралась статистика в 500 мгновенных измерений объемом ~5,5 Гб. Одно мгновенное измерение состоит из четырех пар изображений, регистрируемых с частотой 1 Гц. После реконструкции размер области потока с объемным распределением трассеров составлял  $40 \times 36 \times 4,2 \text{ мм}^3$  ( $768 \times 1024 \times 128 \text{ вокс}^3$ ). Общий размер 500 реконструированных объемных изображений составлял ~130 Гб. Расчет полей скорости проводился итерационным корреляционным алгоритмом с размером области осреднения на последней итерации  $1,66 \times 1,125 \times 0,525 \text{ мм}^3$  ( $32 \times 32 \times 16 \text{ вокс}^3$ ) и перекрытием 50%. В результате получены поля скорости размером  $47 \times 64 \times 15$  векторов. Для обработки данных использовалась серверная станция с процессорами 2x12-Core AMD Opteron 6168, 1900 МГц (всего 24 ядра). Время реконструкции одного мгновенного измерения на указанной системе алгоритмом MLOS+SMART 10 составляло 430 с. Время корреляционной обработки для расчета одного поля скорости составило 160 с. Непрерывное время обработки 500 мгновенных измерений для одной измерительной области составило около 4 суток.

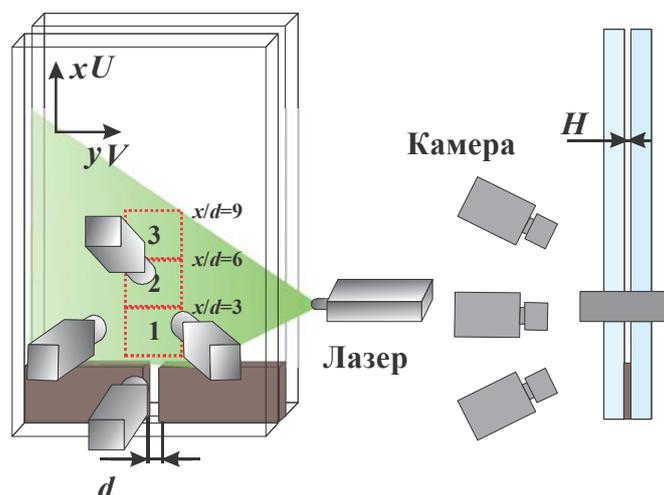


Рис. 4 Схема экспериментальной установки и расположение измерительных областей

Для калибровки оптической системы использовалась плоская калибровочная мишень размером  $50 \times 50 \text{ мм}$  с опорными точками-окружностями на декартовой сетке с шагом 2 мм. Во время выполнения процедуры самокалибровки определена и успешно исправлена разъюстировка верхней камеры, которая, вероятно, произошла во время извлечения калибровочной мишени из рабочего участка экспериментальной установки. Измерительная область данной камеры сместилась примерно на 3 мм вверх (около 150 пикс на изображении), что не позволяло напрямую использовать данные с этой камеры для томографической реконструкции. Разъюстировка верхней камеры исправлена вручную путем соответственного смещения положения маркеров модели калибровочной мишени для этой камеры. Максимальная величина диспаратета определенная в процессе дальнейшей самокалибровки составила около 5 пикс. Остаточное нескорректированное среднее значение диспаратета после четырех итераций процедуры самокалибровки не превышало 0,05 пикс, что соответствует точности сведения лучей наблюдения всех четырех камер необходимой для успешной реконструкции объема с частицами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате измерений была зарегистрирована трехмерная структура потока, впервые получен ансамбль мгновенных распределений трех компонент скорости струйного течения в объеме щелевого канала.

Пример распределения изоповерхностей для модуля средней скорости представлен на рис. 5. Можно заметить, что присутствует градиент скорости по глубине канала (рис. 5, б). Изменение величины продольной компоненты средней скорости  $U$  по глубине составляет порядка 5% от  $U_c$ . В поперечном сечении канала в горизонтальной плоскости  $x = \text{const}$  наблюдается радиальная симметрия значения модуля скорости (рис. 5, в), подобная распределению скорости в осесимметричной затопленной струе. В измерениях значения скорости в точках измерения усредняются по объему расчетной области  $1,66 \times 1,125 \times 0,525 \text{ мм}^3$ , поэтому величина скорости вблизи стенок канала не стремится к нулю. Оценка скорости непосредственно вблизи стенок канала затруднена вследствие артефактов томографической реконструкции. Для более точной оценки скорости вблизи стенки канала методом Томо PIV необходимо увеличивать пространственное разрешение за счет применения камер с большим размером светочувствительной матрицы либо использовать метод для идентификации скорости отдельных частиц 3D PTV. Так же возможно использовать большее оптическое увеличение для разрешения структуры течения вблизи стенок канала, однако, при этом, неизбежно будет уменьшаться размер измерительной области.

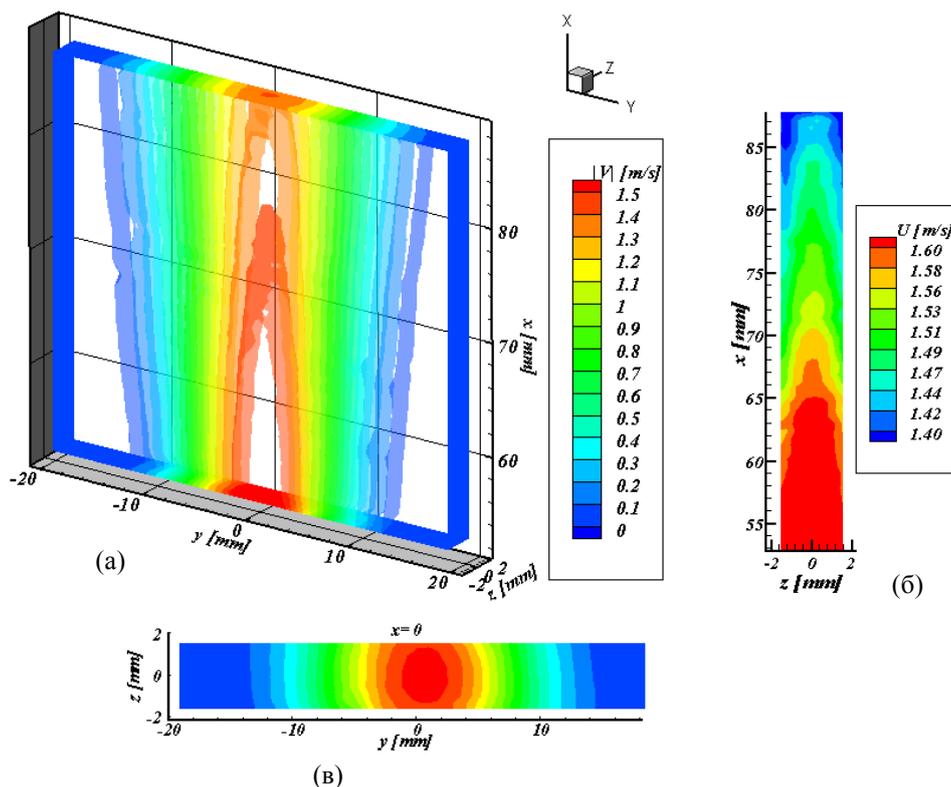


Рис 5. Экспериментальные данные. Поле средней скорости (изоповерхностями показаны значения модуля средней скорости) и линии тока (а), продольная компонента средней скорости в сечении  $y = 0$  по оси струи поперек канала (б), распределение величины модуля средней скорости в сечении  $x = 70 \text{ мм}$  (в) для режима течения  $Re = 20\,000$  в третьей измерительной области

На рис. 6, (а) показано сравнение профилей продольной компоненты нормированной средней скорости в центральной плоскости канала, полученных методами PIV и Томо PIV. Ось абсцисс графика нормирована на полуширину струи  $b$ . По высоте график нормирован на значение скорости на оси струи. Сравнение показало хорошее совпадение результатов измерения средней скорости. При этом геометрические параметры сопла для PIV и Томо PIV экспериментов отличались (рис. 6, а)  $H/d = 0,2$  и  $H/d = 0,4$ , поэтому в области за слоем

смещения  $|y/b| > 1,5$  результат томографического измерения показывает несколько большее значение скорости. Текущий результат качественно совпадает с измерениями скорости в воздушной струе в плоском канале взятыми из работы [20]. В данном случае профиль построен для дальней области струи  $x/d = 20$ ,  $Re = 28\ 000$ ,  $H/d = 36$ , в которой наблюдалась автомодельность потока.

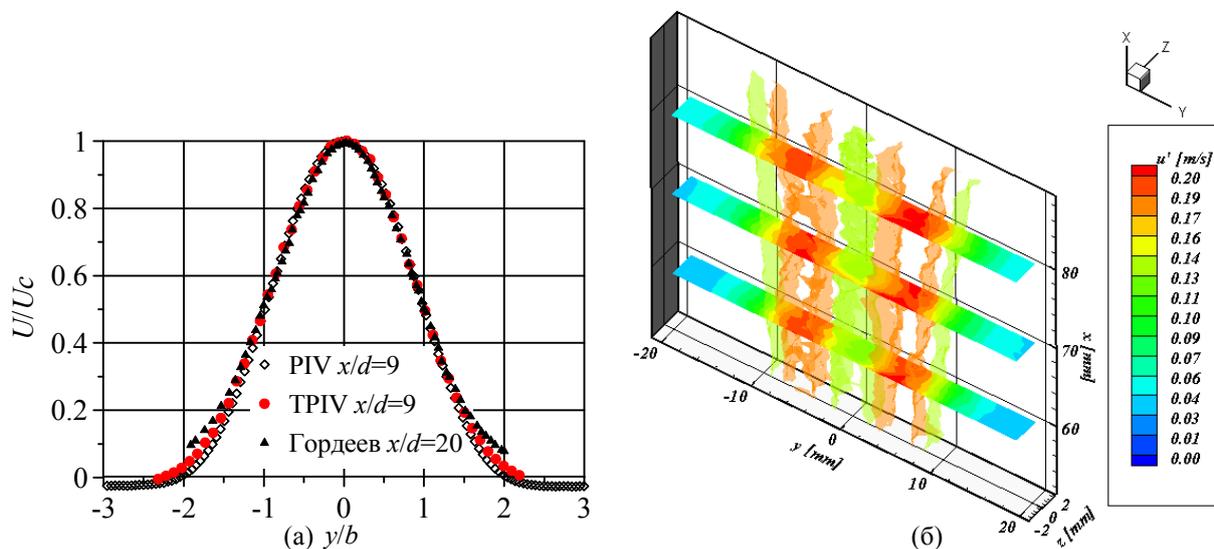


Рис 6. Сравнение профилей нормированной средней скорости в центральной плоскости канала  $z=0$ . Представлены результаты текущего томографического эксперимента  $Re = 20\ 000$ , плоскостного PIV эксперимента для  $H = 2$  мм,  $d = 10$  мм,  $Re = 20\ 000$  и данных взятых из работы [20] для воздушной струи,  $H = 457$  мм,  $d = 127$  мм,  $Re = 28\ 000$  (а). Распределение пульсаций продольной компоненты скорости, показаны изоповерхностями и сечениями для  $x = 60, 70, 80$  мм (б)

На рис. 6, (б), представлены пульсации продольной компоненты скорости в измерительном объеме. Максимальное значение интенсивности турбулентных пульсаций в слое смещения достигает  $\sim 13\%$  от значения модуля скорости на оси струи. В областях с максимальным значением флуктуации скорости локализуются вихри, что также показывает дальнейший анализ мгновенных распределений скорости. На рис. 7, (а) показано мгновенное поле скорости и линии тока течения. В слое смещения струи визуализируются крупные вихревые структуры, распространяющиеся вниз по потоку. На рис. 7, (б) показана локализация вихревых структур по критерию  $\lambda_2$ , где изоповерхностями представлена величина собственных значений тензора  $S^2 + \Omega^2$ , также на рисунке показано поле скорости в центральном сечении канала в системе отсчета движущейся со скоростью  $U_c/2$  по оси  $x$ . Видно, что положения областей ограниченных изоповерхностями совпадают с центрами вихрей визуализируемых полем скорости. Целью визуализации была идентификация крупномасштабных когерентных вихревых структур, линейный размер которых на порядки превышает поперечный размер течения и которые, как предполагается, доминируют в плоской геометрии струйного течения в дальнем поле струи. Можно заметить, что идентифицированные вихри попарно чередуются в вихревой дорожке (рис. 7).

Непосредственно перед расчетом производных для локализации вихревых структур мгновенное поле скорости однократно сглаживалось фильтром с прямоугольной импульсной характеристикой и размером ядра  $5 \times 5 \times 3$  узлов. Это необходимо для идентификации крупномасштабных вихрей и для подавления высокочастотной составляющей сигнала, которая связана с мелкомасштабными пульсациями скорости и погрешностью измерения. Элементы тензора градиента скорости вычислялись правой разностной схемой первого порядка.

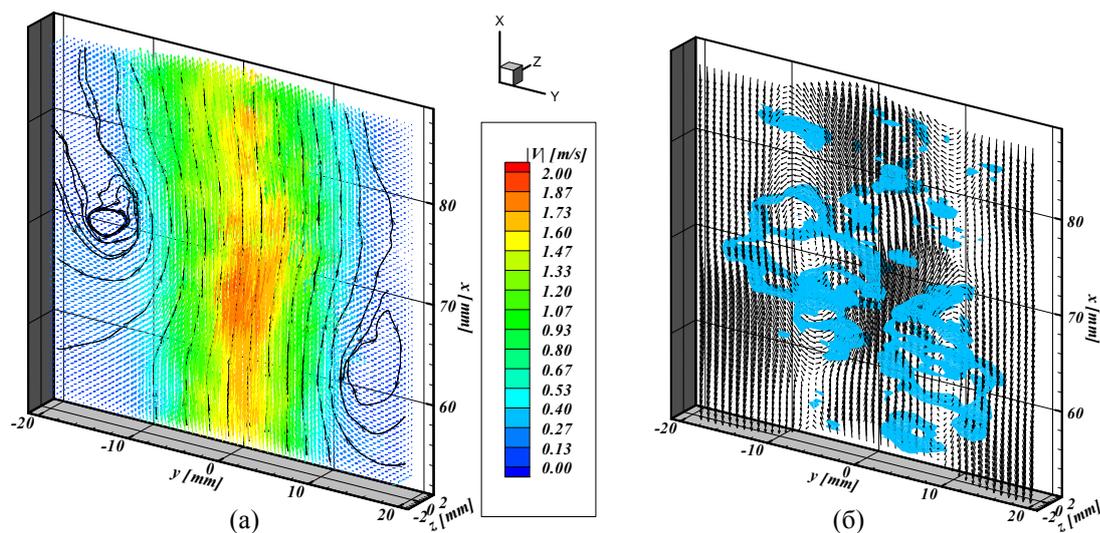


Рис 7. Поле мгновенной скорости (цветом показаны значения модуля средней скорости) и линии тока (а). Поле мгновенной скорости в системе отсчета  $(U_c/2, 0, 0)$  для плоскости  $z=0$  и изоповерхности значений по критерию  $\lambda_2$  локализации вихревых структур (б) для режима течения  $Re = 20\,000$  в третьей измерительной области

Абсолютная погрешность оценки скорости методом томографической цифровой трассерной визуализации находится на уровне  $0,3 - 0,4$  вокс (рис. 2, б), поэтому относительная погрешность зависит, главным образом, от величины модуля скорости. Максимальная точность оценки модуля мгновенной скорости составляет  $\sim 3\%$  для области вблизи оси струи. Погрешность оценки  $v$  компоненты скорости в среднем по измерительной области составляет  $20\%$ , погрешность оценки  $w$  компоненты в среднем составляет  $40\%$ , что является довольно грубой оценкой. Последнее связано с существенной двумерностью потока в плоском канале, когда средние значения скорости течения поперек канала близки к нулю.

На данном этапе разрешение метода Томо PIV оказалось недостаточным для измерения скорости в пристенной области на расстоянии менее  $H/8 = 0,5$  мм от стенок канала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализован метод Томо PIV для измерения трехмерных полей скорости в объеме. Исследовано поведение алгоритмов томографической реконструкции и корреляционного алгоритма расчета смещения частиц при различных параметрах регистрации начального распределения интенсивности. В результате тестирования на синтетических изображениях получены оптимальные значения концентрации трассеров  $N_{ppp} = 0,08$  част/пикс, при которых величина случайной ошибки минимальна и достигает  $\delta = 0,36$  вокс.

Применение разработанных подходов в эксперименте показало принципиальную возможность измерения трехмерных трехкомпонентных полей скорости в щелевом канале. Впервые получен ансамбль мгновенных распределений трех компонент скорости струйного течения в объеме щелевого канала. Сравнение с другими методами и авторами демонстрирует удовлетворительное совпадение результатов. С помощью линий тока и критерия  $\lambda_2$  выполнена визуализация крупномасштабных вихревых структур в дальнем поле течения, попарно чередующихся в виде вихревой дорожки.

В целях дальнейшего повышения качества получаемых экспериментальных данных необходимо обеспечить более высокое пространственное разрешение регистрирующих камер и увеличить концентрацию частиц на изображениях до оптимального значения  $0,08$  част/пикс. Отметим, что разработанные подходы без существенных изменений могут быть применены для высокочастотной регистрации полей скорости при помощи скоростных

камер и источников излучения. Это позволит изучать эволюцию вихревых структур в потоке с частотами до единиц кГц и более.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана: Министерством образования и науки Российской Федерации (в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы); проектом 7-ой рамочной программы ЕС (№ 265695, AFDAR); грантом президента РФ для молодых кандидатов наук МК-7737.2010.8; гранта Правительства России для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских вузах № 11.G34.31.0035 (ведущий ученый – В.Е. Захаров, ГОУ ВПО «Новосибирский государственный университет»)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Elsinga G.E., Scarano F., Wieneke B., van Oudheusden B.W.** Tomographic particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2006. Vol. 41. P. 933-947.
2. **M. Stanislas, K. Okamoto, C. J. Kähler, J. Westerweel** Main results of the third international PIV challenge // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 45. P. 27-71.
3. **R. J. Adrian** Twenty years of particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2005. Vol. 39. P. 159-169.
4. **Hinsch K.D.** Holographic particle image velocimetry // *Meas. Sci. Technol*. 2002. 13. R61-R72.
5. **Brücker Ch.** Digital-Particle-Image-Velocimetry (DPIV) in a scanning light-sheet: 3D starting flow around a short cylinder. // *Exp Fluids*. 1995. Vol. 19. P. 255-263.
6. **Maas H.G., Gruen A., Papantoniou D.** Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows // *Exp. Fluids*. 1993. Vol. 15. P. 133-146.
7. **Petra S., Andreas S., Schnörr C.** 3D Tomography from Few Projections in Experimental Fluid Dynamics Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design // *Imaging Measurement Methods for Flow Analysis*. 2009. Vol. 106. P. 63-72.
8. **Wieneke B.** Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 45. P. 549-556.
9. **Worth N.A., Nickels T.B.** Acceleration of Tomo-PIV by estimating the initial volume intensity distribution // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 45. P. 847-856.
10. **Atkinson C., Soria J.** An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2009. Vol. 47. P. 553-568.
11. **Хермен Г.Т.** Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. М.: Мир, 1983.
12. **Лаврентьев М.М., Зеркаль С.М., Трофимов О. Е.** Численное моделирование в томографии и условно-корректные задачи. Новосибирск: Изд-во ИДМИ НГУ, 1999.
13. **Elsinga G.E., Kuik D.J., van Oudheusden B.W., Scarano F.** Investigation of the three-dimensional coherent structures in a turbulent boundary layer with Tomographic-PIV // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 8 - 11 January 2007, Reno, Nevada.
14. **Hain R., Kähler C. J., Michaelis D.** Tomographic and time resolved PIV measurements on a finite cylinder mounted on a flat plate // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 45. P. 715-724.
15. **David L., Fraticelli R., Wieneke B., Thomas L.** Investigation of three-dimensional vortex structures in crossflow by time-resolved tomographic PIV // *Exp. Fluids*. 2009. Vol. 47. P. 707-720.
16. **Жак В.Д.** Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Новосибирск 1986.
17. **Gorin A.V. Sikovsky D.Ph. Nakoryakov V.E. and Zhak V.D.** (1998) Two-dimensional Turbulent Jet in a Hele-shaw Cell // *Proceedings 7th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tainan, Taiwan, pp. 269-279.
18. **Ложкин В.А., Маркович Д.М., Шестаков М.В.** Исследование квази-двумерной турбулентной струи в щелевом канале // 8-ая международная научная конференция

«Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» Алушта, Украина, 20 - 24 сентября, 2010.

19. 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, принято в печать.

20. Gordeyev S.V., Thomas F.O. Coherent structure in the turbulent planar jet. Part 1. Extraction of proper orthogonal decomposition eigenmodes and their self-similarity // J. Fluid Mech. (2000), Vol. 414, P. 145-194.

A.V. Bilsky<sup>1</sup>, V.A. Lozhkin<sup>2</sup>, D.M. Markovich<sup>1,2</sup>, M.P. Tokarev<sup>1</sup>, M.V. Shestakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,  
630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: bilsky@itp.nsc.ru

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia  
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2, E-mail: dmark@itp.nsc.ru

## APPLICATION OF TOMOGRAPHIC VELOCIMETRY FOR VOLUMETRIC FLOW MEASUREMENTS

*The non-intrusive optical tomography method of volumetric velocity field measurements in the flow is described. The essence of the method is the evaluation of the flow velocity inside the measurement volume by determining the displacement of tracer particles during a short time period between the laser pulses. The main difference of Tomographic Particle Image Velocimetry from the standard Particle Image Velocimetry is the tomographic reconstruction of the three-dimensional image. One of the major problems hindering the wide dissemination of this method is currently the high computational resource consumption, large amount of disk and RAM memory needed for the Tomo PIV data processing.*

*Software algorithms for experimental data processing obtained using tomographic digital image velocimetry were implemented by the authors of the paper. Also the tomographic reconstruction accuracy and the particle displacement assessment error were studied using synthetic images. The described tomographic method of volumetric flow velocity field estimation was used for the diagnostics of a turbulent submerged jet flowing into a narrow channel. An experimental application of the developed approaches for the first time allowed obtaining the volumetric spatial distribution of the mean velocity field and three-dimensional instantaneous velocity fields.*

VOLUMETRIC VELOCITY MEASUREMENTS, OPTICAL TOMOGRAPHY, SLOT JET