

УДК 532.57+519.6

Оптимизация и тестирование томографического метода измерения скорости в объеме потока *

**А.В. Бильский¹, В.А. Ложкин², Д.М. Маркович^{1,2}, М.П. Токарев¹,
М.В. Шестаков¹**

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mail: dmark@itp.nsc.ru

В статье рассматривается оптический бесконтактный метод измерения полей скорости в объеме потока для гидроаэродинамического эксперимента. Суть метода состоит в измерении перемещения частиц в потоке за короткое время между вспышками лазера. В работе предложено и реализовано несколько алгоритмических оптимизаций, позволяющих уменьшить время обработки данных. Показано, что использование пороговой фильтрации фона на зарегистрированных проекциях — изображениях частиц и быстрой оценки начального распределения интенсивности в объеме позволяет увеличить до двух-трех раз скорость работы алгоритма томографической реконструкции. В работе проведено исследование точности 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 среднего поля скорости и мгновенные поля скорости в области измерения.

Ключевые слова: измерение поля скорости в объеме потока, оптическая томография, плоская струя.

ВВЕДЕНИЕ

Томографический метод цифровой трассерной визуализации Tomo PIV (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 TomoPIV, 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,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант МК-7737.2010.8) и Мин. обр. и науки РФ (в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг).

поток, подобно традиционным PIV методам, дважды, с контролируемой временной задержкой, освещается лазерным импульсом, но 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.

В настоящее время томографические методы широко применяются для исследования внутренней структуры объектов. В основном они используются в медицинской диагностике, в промышленности и строительстве для контроля качества всевозможных изделий и инженерных сооружений. Математический аппарат вычислительной томографии изложен в монографиях [7, 8]. В работе [9] рассмотрены методы повышения контрастности малоракурсных томограмм, полученных алгебраическими алгоритмами реконструкции.

Основным отличием томографической цифровой трассерной визуализации для экспериментальной гидроаэродинамики от медицинских томографических исследований является малое количество проекций, используемое для восстановления объемного изображения измерительной области потока. Вследствие записи небольшого числа проекций задача получения приближения исходного распределения интенсивности рассеянного света на трассерах усложняется, однако форма и разреженность полезного сигнала (локализованные в пространстве узкие пики интенсивности), в конечном итоге, позволяет реконструировать объемное распределение интенсивности требуемого качества, подходящее для дальнейшего корреляционного анализа и оценки смещения трассеров в потоке. В данном случае для томографической реконструкции измерительной области потока применяются приближенные алгоритмические подходы [10].

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 [10]. Таким образом, в эксперименте необходимо

поддерживать определенную концентрацию трассеров. 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. В этом случае к результатам фотограмметрической калибровки применяются поправки, рассчитанные путем совмещения положений наиболее ярких частиц в измерительном объеме [11]. Одной из существенных проблем, сдерживающих широкое распространение данного метода в настоящее время, является высокая ресурсоемкость Томо PIV алгоритмов. Время расчета одного поля скорости составляет 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 [10, 12, 13], где рассматривались различные алгебраические методы томографической реконструкции, а также варианты оценки начального распределения интенсивности для уменьшения времени сходимости алгоритма реконструкции. Наиболее эффективной по скорости сходимости и наивысшему соотношению сигнал/шум является схема SMART (Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique) с оценкой начального распределения по схеме MLOS (Multiplicative Line Of Sight) [13].

Известные на сегодняшний день в литературе факты применения метода Томо PIV крайне ограничены и насчитывают единицы работ: эксперименты по изучению когерентных структур в пограничном турбулентном слое [14]; изучение обтекания конечного цилиндра, закрепленного на плоскости [15]; анализ трехмерных вихревых структур в сносящем потоке [16].

Целью данной работы является исследование эффективности алгоритма томографической реконструкции при различных параметрах регистрации для получения полей скорости в объеме потока методом Томо PIV, применение алгоритма для измерения трехкомпонентных полей скорости в каноническом эксперименте — распространение турбулентной струи в щелевом зазоре. Одной из главных задач работы является оптимизация метода томографической реконструкции объемного распределения интенсивности по времени обработки экспериментальных данных.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ СКОРОСТИ

Иллюстрация принципов работы алгоритма, используемого для получения поля скоростей в измерительном объеме потока, показана на рис. 1. Метод включает три шага: калибровку оптической системы, томографическую реконструкцию и корреляционную обработку восстановленных объемных изображений частиц.

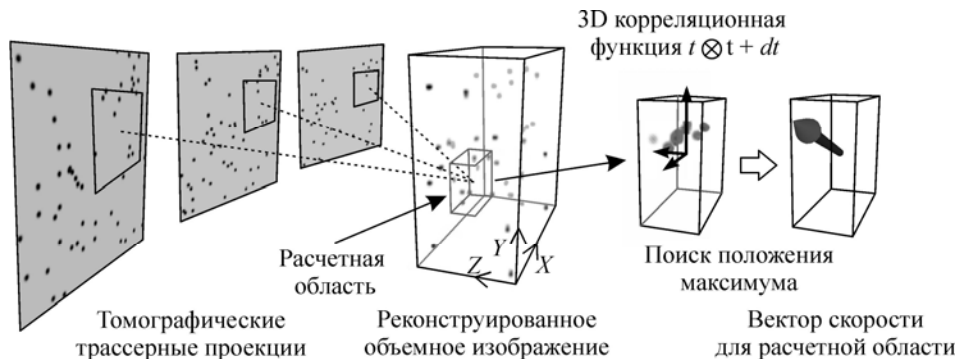


Рис. 1. Иллюстрация принципов работы алгоритма оценки поля скорости в методе Томо PIV.

Калибровка оптической системы заключается в геометрической калибровке всех камер, использующихся 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.

Также дополнительно для уточнения моделей камер применялся метод самокалибровки по зарегистрированным экспериментальным изображениям частиц [11]. 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.

Основным шагом получения поля скорости в методе Томо PIV является восстановление трехмерного распределения интенсивности алгоритмом итерационной алгебраической реконструкции (см. рис. 1). Задача реконструкции сводится к задаче решения сильно недоопределенной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) (1), для решения которой известно несколько итерационных методов. Одним из эффективных алгоритмов для задачи восстановления объемной интенсивности света, рассеянного частицами, по скорости оценки и точности реконструкции на сегодняшний день является алгоритм SMART [13]. 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 μ — 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. На рис. 2 в плоском сечении $Z = 64$ вокс объемного изображения размером $512 \times 128 \times 128$ вокс представлены модель (а) и результаты ее реконструкции по трем проекциям, зарегистрированным с направлениями ракурса наблюдения $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 125^\circ$; $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 90^\circ$; $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 55^\circ$, после одной (b), пяти (c), десяти (d) итераций алгоритма. Здесь азимутальный угол наблюдения φ отсчитывался между проекцией оптической оси камеры и осью Y (см. рис. 1), полярный угол наблюдения θ отсчитывался

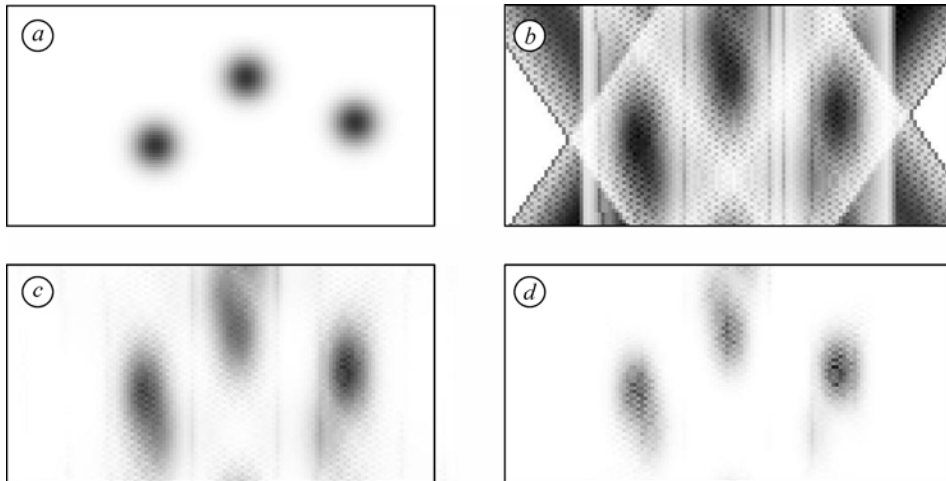


Рис. 2. Иллюстрация процесса томографической реконструкции в сечении. Точное распределение интенсивности (а), рассчитанное распределение после одной (b), пяти (c), десяти (d) итераций SMART.

между оптической осью камеры и осью X (см. рис. 1). На рис. 2 размеры частиц специально были увеличены для наглядности.

Заключительным шагом Томо PIV алгоритма является корреляционный анализ полученных пар объемных изображений частиц для оценки поля скорости (см. рис. 1). Принцип кросскорреляционного алгоритма, применяемого для томографических измерений, не отличается от алгоритма, используемого для плоскостных измерений, при этом добавляется оценка третьей компоненты скорости по глубине области измерения.

ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА

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 [11, 13]:

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

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

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (u_{0i} - u_i)^2}, \text{ где } u_{0i} \text{ — истинное значение скорости и } u_i \text{ — рассчитанное}$$

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 : $V(Z, X) = V_0 \cdot 2w/iw(Z + d)/d \sin(2\pi X/w)$ 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 Томо PIV измерений, отдельно для трех параметров регистрации: концентрации трассеров в исследуемой области N_{ppp} , которая изменялась в пределах от 0,01 до 0,5 част/пикс, направления ракурса наблюдения камер (θ, φ) и количества регистрирующих камер N . Для всех случаев, кроме теста на оптимальное количество проекций, камеры в модели располагались крестообразно: сверху, снизу, справа и слева. Угол φ принимал значения {95, 75, 70, 60, 45, 35} градусов. Угол θ также принимал значения {85, 75, 70, 60, 45, 35} градусов. В тесте на определение оптимального количества проекций камеры располагались таким образом, что угол между оптической осью и осью Z составлял $\alpha = 45$ градусов, и камеры были равномерно распределены по окружности. 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 $iw \times iw = 256 \times 256$ пикс, линейный размер пикселя составлял 1/256 мм. Для каждого значения тестируемого параметра обработано по 10 полей скорости. 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. 3, *a, b* показаны зависимости значения коэффициента корреляции Q от концентрации трассеров в измерительном объеме, числа итераций алгоритма томографической реконструкции и количества зарегистрированных проекций. Видно, что с увеличением количества используемых проекций и числа итераций точность томографической реконструкции быстро возрастает и дальнейшее их увеличение практически не приводит к значительному улучшению точности. По результатам тестирования определено оптимальное число регистрирующих камер $N = 4$ шт., а оптимальное количество SMART итераций $I = 15$. Также зависимость величины корреляции Q от количества регистрирующих камер N сравнивалась с результатами, представленными в [1] для случая двумерной реконструкции изображений (см. рис. 3, *b*).

В результате тестирования на указанных синтетических изображениях показано, что разброс значений полной ошибки смещения трассеров для различных параметров достаточно велик: $\delta = 0,3 \div 1,3$ вокс, что говорит о важности

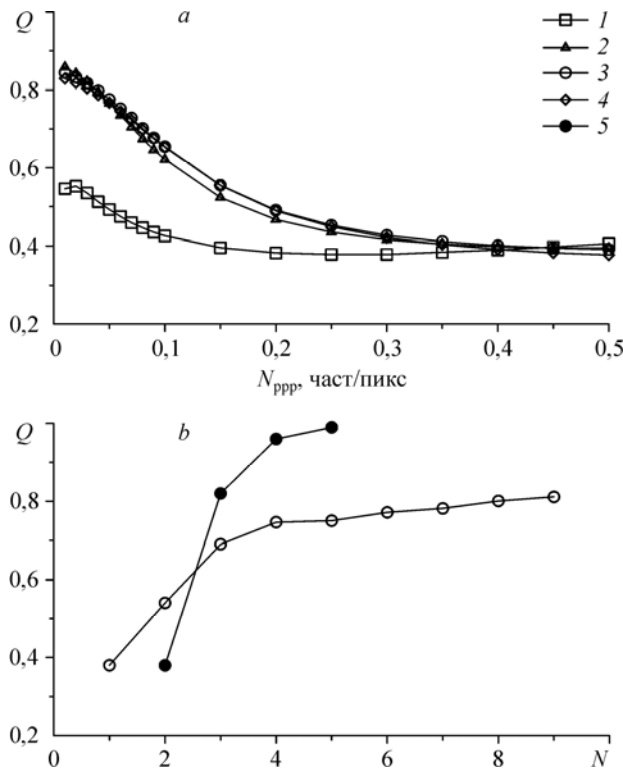


Рис. 3. Зависимость точности томографической реконструкции от концентрации трассеров (а), от количества зарегистрированных проекций (концентрация частиц в области измерения $N_{ppp} = 0,05$ част/пикс, $\theta = 45^\circ$) (б).

Алгоритмы: 1 — MLOS, 2 — SMART 5, 3 — SMART 15, 4 — SMART 30, 5 — [1].

правильного подбора параметров как самого эксперимента, так и параметров обработки данных. На рис. 4, а представлена зависимость величины полной ошибки оценки смещения частиц от значения концентрации трассеров. На основе полученной зависимости определено оптимальное значение концентрации частиц $N_{ppp} = 0,08$ част/пикс. На рис. 4, б показана зависимость величины полной ошибки смещения частиц от направления ракурса наблюдения камеры. Видно, что при $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 75^\circ$ достигается минимум ошибки оценки смещения частиц.

МЕТОДЫ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Алгоритм томографической реконструкции в методе Томо PIV подразумевает обработку больших объемов данных, что обуславливает высокую ресурсоемкость данного метода. Так, например, только для хранения интенсивности одной реконструируемой измерительной области f_j по изображениям проекций размером 1 Мпикс требуется порядка 1 Гб памяти. Для проекций размером 4 Мпикс объем необходимой памяти увеличивается до 8–9 Гб. Эти оценки не включают объем памяти, необходимый для хранения весовой матрицы W_{ij} , элементы которой, даже с учетом сильной разреженности, обычно занимают десятки гигабайт. Поэтому они обычно хранятся на диске или вычисляются во время работы алгоритма.

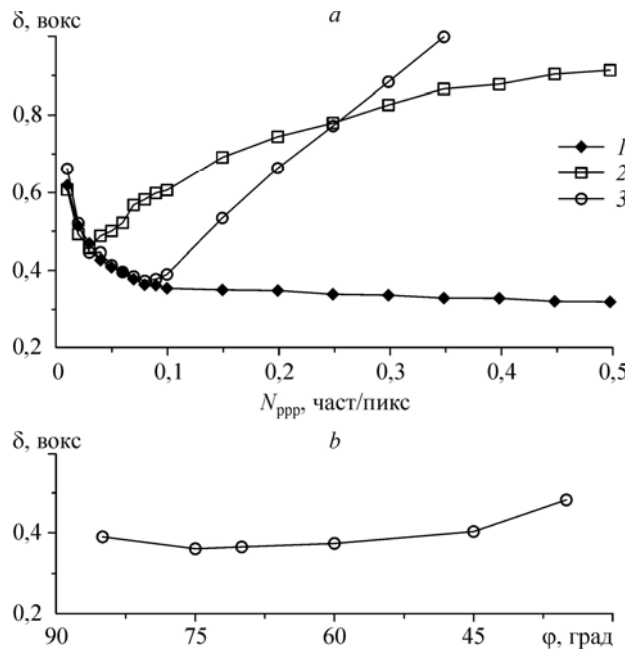


Рис. 4. Зависимость полной ошибки оценки смещения частиц от их концентрации (число камер $N = 4$) при направлении ракурса наблюдения $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 60^\circ$ — *a*, угла регистрации при концентрации частиц $N_{ppp} = 0,08$ част/пикс — *b*.

Без реконструкции изображения — 1, по алгоритмам: MLOS — 2, SMART 15 — 3.

Как уже упоминалось выше, одной из существенных проблем, сдерживающих широкое распространение метода Томо PIV в гидроаэродинамическом эксперименте в настоящее время, является длительное время обработки данных. Время расчета одного поля скорости размером $60 \times 60 \times 30$ векторов составляет от 0,5 до 1 часа (в зависимости от выбранных параметров) при обработке изображений с разрешением 1 Мпикс на персональном компьютере с процессором Intel Core2Duo с 3 гигабайтами ОЗУ в многопоточном режиме.

Для численного решения СЛАУ (1) применяется итерационный подход, скорость сходимости которого к точному решению определяется, в частности, начальным решением f_j^0 . Одним из эффективных способов уменьшения времени томографической реконструкции является оценка подходящего начального распределения интенсивности в реконструируемом объеме. Использование заданной оценки распределения интенсивности вместо равномерного распределения позволяет добиться уменьшения времени обработки в несколько раз за счет уменьшения количества итераций, достаточных для сходимости решения СЛАУ (2).

На основе существующих работ [12, 13] была реализована схема быстрой оценки начального распределения интенсивности в измерительном объеме. Суть метода состоит в присвоении интенсивности каждому элементу восстанавливаемого объема, равной произведению интенсивностей пикселей проекций, из которых он наблюдаем (MLOS). В этом случае в объеме остаются проекционные линии (см. 2, *b*), на которых находятся частицы. Данная схема позволяет добиться большей точности реконструированных изображений, а также снижает время обработки до трех раз. Помимо произведения интенсивности проекций можно брать другие оценки, например, минимальное значение или сумму.

Следующая оптимизация касается уменьшения времени обработки данных за счет сокращения времени на вычисление параметров соседних линий наблюдения при расчете элементов проецирующей матрицы W_{ij} . Интенсивность пикселя регистрирующей матрицы камеры формируется как взвешенная сумма интенсивности всех элементов измерительного объема, лежащих на линии наблюдения для данного пикселя. Для типичной оптической системы, используемой в Томо PIV измерениях, с макрообъективами 50–100 мм и расстоянием до объекта 300–1000 мм угловые параметры линий наблюдения соседних пикселей отличаются незначительно. Поэтому можно не рассчитывать параметры линии наблюдения для каждого пикселя, а рассчитывать, например, направление каждой второй линии наблюдения и использовать эту информацию в соседних областях, где расчет не проводился. Данный подход увеличивает скорость расчета, однако может негативно сказаться на точности метода. В результате оценки влияния такого метода оптимизации на точность определения поля скорости показано, что погрешность и пространственное разрешение оценки скорости в объеме потока при использовании данного метода оптимизации ухудшаются незначительно, поэтому данный подход может быть использован для ускорения обработки данных.

Еще одна проведенная оптимизация производительности алгоритма томографической реконструкции состоит в разделении зарегистрированных проекций-изображений частиц на составляющую фона и образы частиц. При этом образы частиц соответствуют полезному сигналу, а область фона, достигающая до 1/2 площади изображения, может быть исключена из рассмотрения. Источником фона в условиях реального эксперимента являются паразитные отражения, освещение экспериментального помещения, шум матрицы камеры и т. д. Реконструированный шум, содержащийся в фоновом сигнале, ухудшает точность оценки поля скорости корреляционным алгоритмом. В настоящей работе экспериментальные и модельные изображения частиц характеризовались равномерной интенсивностью фона, поэтому была применена простая схема сегментации изображений на основе пороговой фильтрации с постоянным значением порога, равным 2/3 от максимальной интенсивности на изображении. При этом фоновый сигнал в результирующем объеме практически отсутствовал. По результатам тестирования применение данного метода позволило добиться увеличения производительности на 20 %.

Другие перспективные возможности оптимизации скорости работы алгоритма связаны с массовой параллельной обработкой на современных высокопроизводительных вычислительных кластерах и графических процессорах GPGPU. Однако обсуждение стратегий параллельной обработки данных Томо PIV эксперимента выходит за рамки данной статьи.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Описанные выше подходы были применены в эксперименте для измерения полей скорости турбулентной затопленной струи, вытекающей в узкий канал. Фотография экспериментальной установки представлена на рис. 5. 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 мм² 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. Сопло было образовано двумя плоскими вставками, изготовленными по профилю

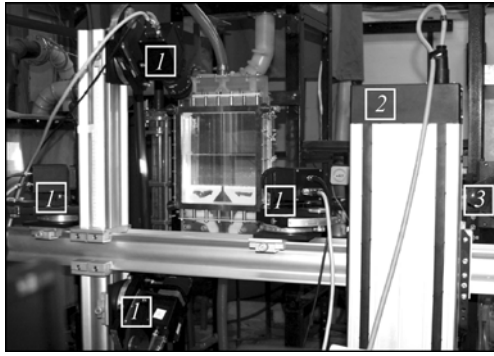


Рис. 5. Фотография экспериментальной установки.

1 — цифровые ПЗС камеры, 2 — моторизованная координатная система, 3 — Nd: YAG лазер.

Витошинского, ширина сопла d составляла 10 мм, длина прямого участка сопла 20 мм.

Для измерения полей мгновенной скорости использовалась измерительная система «ПОЛИС», состоя-

щая 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. После реконструкции размер области потока с объемным распределением трассеров составил $30 \times 30 \times 4,4 \text{ мм}^3$. Расчет скорости проводился по области осреднения $32 \times 32 \times 8 \text{ пикс}^3$ ($1,0 \times 1,0 \times 0,28 \text{ мм}^3$) с перекрытием 50 %. Для калибровки оптической системы использовалась плоская калибровочная мишень размером $50 \times 50 \text{ мм}$ с опорными точками-окружностями на декартовой сетке с шагом 3 мм.

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

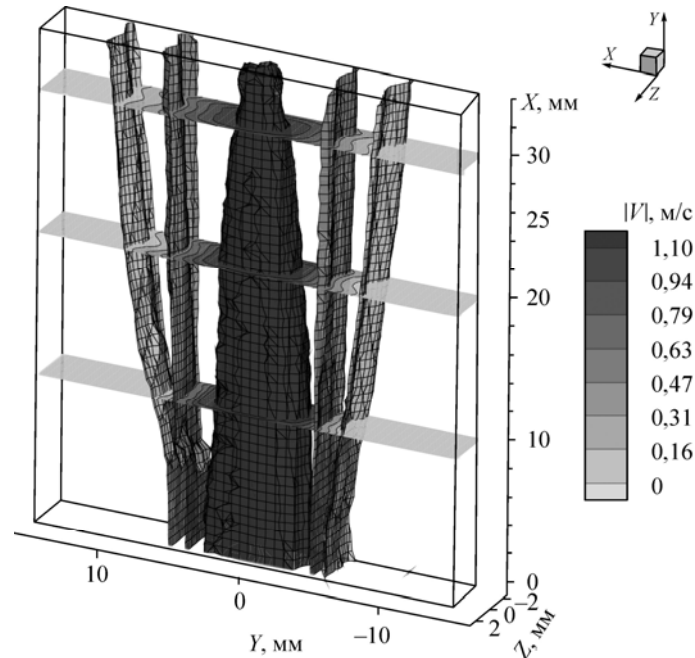


Рис. 6. Исоповерхности и контурные линии средней скорости в турбулентной затопленной струе, вытекающей в узкий канал. $Re = 10\,000$, ширина сопла $d = 10 \text{ мм}$, глубина канала $H = 4 \text{ мм}$.

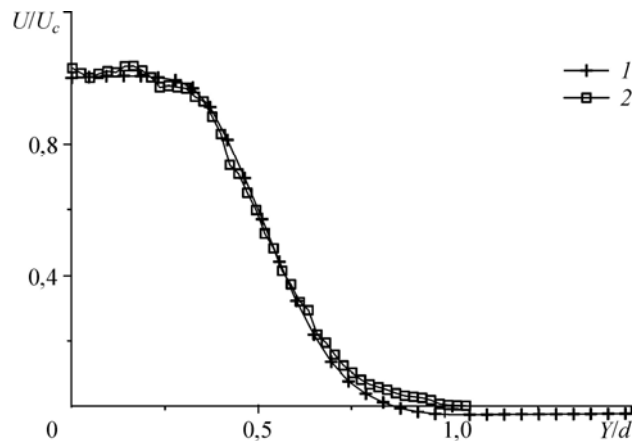


Рис. 7. Сравнение профилей продольной компоненты нормированной средней скорости в центральном сечении струи, полученных методами: 2D PIV (1000 полей) — 1 и 2 Томо PIV (500 полей) — 2.

Расстояние от края сопла $X/d = 2$, $Re = 10\,000$, ширина сопла $d = 10$ мм, глубина канала $H = 2$ мм для PIV и $H = 4$ мм для Томо PIV экспериментов.

изоповерхностей средней скорости представлен на рис. 6. На рис. 7 показано сравнение профилей продольной компоненты нормированной средней скорости в центральном сечении струи, полученных методами PIV и Томо PIV. Сравнение показало качественное совпадение результатов измерения средней скорости. В области за слоем смешения $Y/d = 0,8$ результат томографического измерения показывает большее значение скорости вследствие различной глубины канала при проведении PIV и Томо PIV измерений. На данном этапе разрешение метода Томо PIV оказалось недостаточным для измерения характеристик потока в пристенной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе полностью реализован метод Томо PIV для измерения трехмерных полей скорости в объеме. Исследовано поведение алгоритмов томографической реконструкции и корреляционного алгоритма при различных параметрах регистрации начального распределения интенсивности. В результате тестирования на синтетических изображениях получены оптимальные значения концентрации трассеров, количества камер и углов направления ракурса наблюдения камер, при которых величина случайной ошибки минимальна и достигает $\sim 0,36$ вокс.

Разработан ряд оптимизаций алгоритма томографической реконструкции распределения интенсивности в объеме. С использованием предложенных подходов удалось достичь снижения времени обработки в 2-3 раза. При этом показано, что применение указанных оптимизаций не снижает точности алгоритма томографической реконструкции.

Применение разработанных подходов в эксперименте показало принципиальную возможность измерения трехмерных трехкомпонентных полей скорости. Впервые получен ансамбль мгновенных распределений трех компонент скорости струйного течения в объеме щелевого канала. Определены пути повышения качества получаемых экспериментальных данных — обеспечение более высокого пространственного разрешения изображений проекций трассеров в потоке.

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. **Stanislas M., Okamoto K., Kähler C.J., Westerweel J.** Main results of the third international PIV challenge // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 45. P. 27–71.
3. **Adrian R.J.** 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. Vol. 13. P. 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. **Хермен Г.Т.** Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. М.: Мир, 1983.
8. **Лаврентьев М.М., Зеркаль С.М., Трофимов О.Е.** Численное моделирование в томографии и условно-корректные задачи. Новосибирск: ИДМИ НГУ, 1999. 172 с.
9. **Лихачев А.В.** Повышение контрастности малоразмерных томограмм, полученных алгебраическими алгоритмами реконструкции // *Вычислительные технологии*. 2009. Т. 14, № 3. С. 37–47.
10. **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.
11. **Wieneke B.** Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2008. Vol. 45. P. 549–556.
12. **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.
13. **Atkinson C., Soria J.** An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry // *Exp. Fluids*. 2009. Vol. 47. P. 553–568.
14. **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 Sci. Meeting and Exhibit, 8–11 January 2007, Reno, Nevada.
15. **Hain R., Kahler 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.
16. **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.

Статья поступила в редакцию 20 января 2011 г.