

УДК 519.6

АЛГОРИТМЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО ПОЛЯ СКОРОСТИ В МЕТОДЕ STEREO PIV

Д. М. Маркович^{1 2}, М. П. Токарев¹

Представлены принципы Stereo PIV измерений мгновенных полей скорости в потоках жидкости и газа. Рассмотрена задача калибровки камер измерительной стереосистемы применительно к оптическим методам измерения скорости. Обсуждаются возможные причины возникновения ошибки измерения скорости при проведении Stereo PIV эксперимента, в том числе предложен численный алгоритм коррекции калибровки измерительной стереосистемы, который позволяет упростить процесс юстировки системы перед проведением измерений. Описаны два метода стереорекострукции полей скорости. Проведено тестирование всех рассмотренных алгоритмов на реальных экспериментальных данных.

Ключевые слова: калибровка камеры, Stereo PIV, течение в трубе, калибровка, стереорекострукция.

1. Введение. Метод измерения скорости Stereo PIV (Particle Image Velocimetry) является расширением планарного метода 2D PIV [1]. Несмотря на возможности, которые представляет метод 2D PIV, этот метод позволяет получать только часть информации, характеризующей течение. Большинство потоков в природе являются существенно трехмерными; следовательно, для более полного описания важно иметь информацию о поведении третьей компоненты скорости. Поэтому одновременно с появлением измерительных систем на основе 2D PIV началась разработка методов, позволяющих восстанавливать нормальную компоненту скорости к плоскости измерения.

Если классифицировать полевые оптические методы измерения скорости по количеству компонент скорости и размерности области измерения, то метод Stereo PIV занимает промежуточное положение между планарными методами 2D PIV, 2D PTV (Particle Tracking Velocimetry) и “объемными” Holography PIV [2], 3D PTV [3] и Tomo PIV [4]. По сложности проведения эксперимента, сложности процедур обработки данных и времени, затрачиваемому на реконструкцию скорости, он также находится примерно посередине.

Stereo PIV измерения основаны на тех же фундаментальных принципах, что и человеческое зрение — это стереовидение. Глаза человека видят несколько отличающиеся друг от друга два плоских изображения окружающих нас предметов; сравнивая эти изображения, человеческий мозг интерпретирует предметы как объемные. Используя только один глаз, можно распознавать движение вверх, вниз и в стороны, однако возникают сложности с оценкой расстояний до предметов и движения в глубину.

Для получения изображений в области измерения в методе Stereo PIV используются две цифровые камеры, направленные на область измерения под разными углами. Как и в методе 2D PIV, каждая камера получает плоскую информацию об объекте измерения. Объединением данных от двух камер можно получить трехмерную информацию об интересующем нас объекте. Основная сложность в этом случае состоит в том, что изображение, полученное камерой, расположенной под углом к измерительной плоскости потока, содержит искажения перспективы. Такие искажения влекут за собой изменение масштабного коэффициента от точки к точке изображения. Для того чтобы найти зависимость масштабного коэффициента от координаты в плоскости изображения, используют специальный метод калибровки камер.

Среди первых публикаций по теме трехкомпонентных измерений с применением метода цифровой трассерной визуализации можно выделить [5]. В этой работе для стереоскопических измерений применялась трансляционная конфигурация. Характерной особенностью такой конфигурации является расположение плоскости изображения параллельно измерительной плоскости потока. Как показал результат, погрешность измерения нормальной компоненты скорости была в три раза больше погрешности измерения скорости для 2D PIV измерений.

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, просп. акад. М. А. Лаврентьева, 1, 630090, Новосибирск; e-mail: dmark@itp.nsc.ru, mtokarev@itp.nsc.ru

² Новосибирский государственный университет, физический факультет, ул. Пирогова, 2, 630090, Новосибирск; e-mail: dmark@itp.nsc.ru

Следующим шагом в развитии стереоскопических измерений стало освоение более сложной в применении угловой конфигурации [6]. Угловая конфигурация имеет ряд преимуществ, главным из которых является возможность измерения с большим углом наблюдения, что позволяет точнее измерять третью компоненту скорости. Однако разнесение камер от нормали к измерительной плоскости повлекло за собой проблему перспективных искажений и проблему фокусировки измерительной плоскости потока по всему полю изображения. Для решения проблемы фокусировки [7] было предложено использовать известное ранее правило Шаймпфлюга (Sheimpflug Rule). Наиболее цитируемой работой по методу реконструкции трехкомпонентного поля скорости является [8], где приведен обобщенный математический аппарат, позволяющий рассчитывать векторные поля для стереоскопических измерений. Одна из задач, которую приходится решать в процессе стереоскопических измерений скорости, — это калибровка камеры. На начальном этапе развития Stereo PIV алгоритмов внешние параметры калибровки камеры (углы обзора и расстояние до плоскости измерения) измерялись непосредственно перед проведением эксперимента, что создавало определенные трудности в юстировке оборудования. В дальнейшем стал применяться автоматический метод калибровки по изображениям, что значительно упростило проведение эксперимента. В работе [9] приведено сравнение двух моделей отображения на основе модели камеры-обскуры для задачи калибровки стереопары в Stereo PIV и DGV (Doppler Global Velocimetry) методах измерения.

Целью настоящей статьи является описание и сравнение двух численных процедур по реконструкции трехкомпонентного поля скорости для метода Stereo PIV на основе метода репроекции изображений и метода локальных градиентов модели камеры. Дополнительно проведен анализ погрешности для каждого из методов, а также рассмотрены пути повышения точности калибровки камеры.

В разделе 2 статьи приводится описание метода Stereo PIV и схема проведения эксперимента. В разделе 3 рассматривается проблема калибровки камеры применительно к оптическим методам измерения скорости. В разделе 4 даны описания двух методов стереорекострукции скорости и рассмотрены их особенности. В разделе 5 приведены результаты тестирования указанных методов на общедоступных экспериментальных данных по измерению скорости в трубе [10].

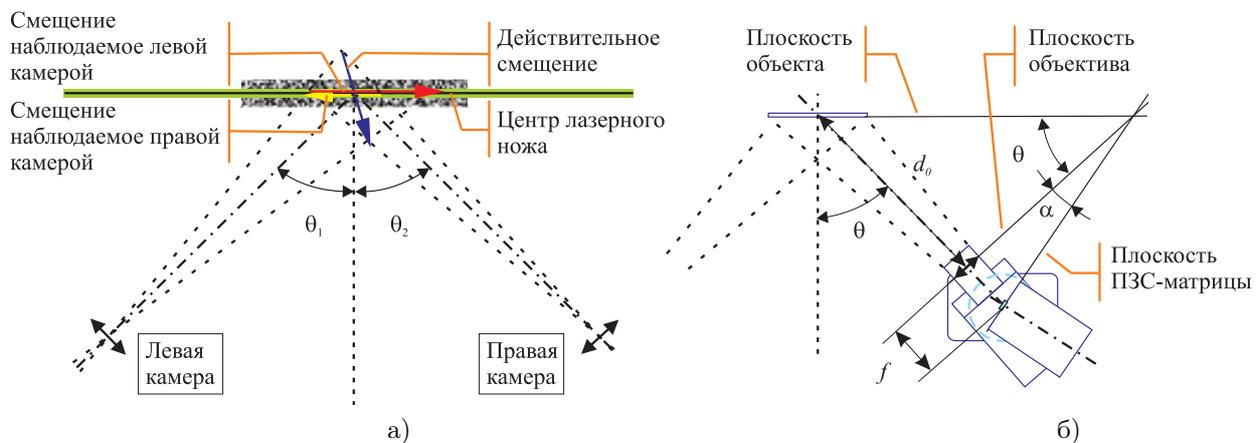


Рис. 1. Схема эксперимента с применением метода Stereo PIV в угловой конфигурации (а); принцип коррекции Шаймпфлюга для съемки в угловой конфигурации (б)

2. Принцип метода. Принцип метода показан на рис. 1а. Поток, в котором необходимо провести измерение скорости, засеивается частицами как и в случае 2D PIV [11]. В современных реализациях PIV освещение сечения потока обычно проводится твердотельным импульсным Nd:YAG лазером, однако толщина “ножа” выбирается несколько больше, чем для плоскостных измерений. Толщина ножа Δz_0 , скорость потока в нормальном направлении v_z и временная задержка между последовательными вспышками лазера Δt должны соотноситься таким образом, чтобы за время задержки частицы не выходили за пределы ножа: $\Delta z_0 > v_z \Delta t$. В процессе измерения свет, рассеянный на частицах, регистрируется матрицей цифровой камеры. Для регистрации изображений используются две камеры, направленные под углами θ_1 и θ_2 (угол отсчитывается от нормали к плоскости измерения). Согласно работе [12], погрешность измерения скорости для стереоскопической угловой конфигурации эксперимента убывает обратно пропорционально тангенсу от угла обзора; поэтому большие значения угла обзора вплоть до 45° являются более предпочтительными.

Stereo PIV эксперимент может проводиться в различных комбинациях относительного расположения светового ножа и регистрирующих камер:

- две камеры располагаются с одной стороны светового ножа (как на рис. 1а);
- две камеры располагаются по разные стороны светового ножа (оппозитное).

Дополнительно может варьироваться положение камер относительно направления рассеяния света лазерного ножа. Например, во втором случае (см. выше) каждая камера может работать на прямом и обратном рассеянии. Оптимальным с точки зрения эффективности освещения потока и пространственного разрешения измерения скорости является оппозитное расположение камер, работающих на прямом рассеянии. Максимальное пространственное разрешение по скорости будет наблюдаться в той части измерительной области, которая расположена ближе к системе регистрации [6].

Основная сложность при использовании угловой конфигурации состоит в том, что плоскость наилучшей фокусировки, расположенная параллельно сенсору изображения, не лежит в плоскости лазерного ножа. Чтобы совместить две эти плоскости, применяется коррекция Шаймпфлюга [7], при которой плоскость объекта, плоскость изображения и плоскость оптической системы линз пересекаются по прямой, при этом измерительная плоскость потока фокусируется на ПЗС-матрицу наилучшим образом (рис. 1б).

Угол для условия Шаймпфлюга может быть вычислен по формуле $\operatorname{tg} \alpha = \frac{f}{d_0} \operatorname{tg} \theta$, где f — фокусное расстояние оптической системы, θ — угол расположения камеры относительно измерительной плоскости и d_0 — расстояние от центра измерительной плоскости до центра оптической системы.

Важным требованием является то, чтобы глубина резко изображаемого пространства (ГРИП) для правой и левой регистрирующих систем перекрывалась либо была сравнима с толщиной лазерного ножа Δz_0 . Это условие необходимо для того, чтобы обе камеры фиксировали одни и те же частицы, локализованные в потоке лазерным ножом. ГРИП выражается в следующем виде: $D_f = \frac{2f^2 K(d_0 - f)d_0 z}{f^4 - K^2(d_0 - f)^2 z^2}$, где f — фокусное расстояние оптической системы, K — число диафрагмы (1.4, ..., 16), d_0 — расстояние от центра измерительной плоскости до центра оптической системы и z — диаметр диска нерезкости (выбирается линейный размер пикселя, например $4,65 \times 10^{-6}$ м).

Для измерения скорости в макропотоках локализация частиц в поперечном направлении осуществляется за счет регулировки толщины лазерного ножа, и ГРИП устанавливается несколько больше толщины ножа $D_f > \Delta z_0$. Для экспериментов с микропотоками там, где достигнуть требуемой локализации в поперечном направлении за счет толщины лазерного ножа не удастся, локализация осуществляется выбором ГРИП оптической системы, т.е. ситуация меняется на противоположную: $\Delta z_0 > D_f$.

При обработке PIV-изображений частиц необходимо выбирать размер расчетной области или ячейки опроса, для которой вычисляется вектор скорости таким образом, чтобы он был не меньше физической толщины лазерного ножа или ГРИП в зависимости от того, чем определяется толщина измерительного объема. Это связано с тем, что при регистрации области потока на цифровую камеру автоматически происходит усреднение флуктуаций скорости с масштабами, меньшими толщины измерительного объема. Дальнейшее повышение пространственного разрешения в плоскости ножа не имеет смысла, особенно для однородных изотропных вихревых течений. Выбор размеров ячейки опроса, в том числе и толщины лазерного ножа, должен быть соотнесен с присутствующими в исследуемом течении масштабами вихревых структур и теми масштабами изменения скорости, которые требуется измерить в процессе эксперимента. Следует помнить, что малая толщина лазерного ножа приводит к усилению влияния шума за счет ухода части частиц из плоскости ножа и роста случайной погрешности измерения. Наоборот, чрезмерно большая толщина ножа приводит к потере в пространственном разрешении измерения скорости в поперечном направлении.

Как уже упоминалось выше, непосредственно перед измерениями выполняется калибровка камер. Этот процесс будет описан в следующем разделе статьи. Далее записываются экспериментальные изображения частиц, по которым восстанавливаются проекции полей скорости с двух направлений обзора. С использованием одного из алгоритмов реконструкции, описанных в разделе 4, вычисляется итоговое трехкомпонентное поле скорости.

3. Калибровка камеры.

3.1. Модель камеры. В процессе калибровки осуществляется привязка глобальной системы координат эксперимента $OXYZ$ к системе координат камеры $O'X'Y'Z'$ [13].

В методе 2D PIV при регистрации изображения потока под прямым углом к плоскости измерения масштабный коэффициент по всему полю изображения остается постоянным, вследствие этого калибровка камеры значительно упрощается и сводится к измерению характерного масштаба на изображении (например, линейки) в единицах пикселей изображения.

Необходимо отметить, что процесс калибровки камеры в оптических методах измерения является неотъемлемой частью не только для Stereo PIV, но и томографических измерений скорости [4] (Томо-

PIV), а также для комбинированных PIV/LIF и PIV/PLIF методов. В последнем случае для разделения светового потока применяются оптические фильтры, при этом свет проходит сложные оптические пути до регистрирующих элементов и возникает задача совместить системы координат изображений для объединения комбинированных данных.

Классическая постановка задачи калибровки камеры [13] состоит в определении внешних и внутренних параметров камеры по набору изображений, полученных с камеры. К внутренним параметрам принадлежат: отношения $a_u = \frac{f}{w}$ и $a_v = \frac{f}{h}$ фокусного расстояния к размеру пикселя по обеим осям, а также координаты (u_0, v_0) принципиальной точки пересечения плоскости изображения с оптической осью. Внешние параметры определяют ориентацию камеры в пространстве: поворот R и смещение T относительно глобальной системы координат $OXYZ$.

Центральная проекция точки в глобальной системе координат (x, y, z) на картинную плоскость (u, v) , выполненное в однородных координатах, представляется выражением

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = AIC \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_u & 0 & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В преобразование проекции F входят матрицы внешней A и внутренней C калибровки камеры, а также матрица проецирования на ретинальную плоскость I . Ретинальной плоскостью в машинном зрении (Computer Vision) называется плоскость, находящаяся на расстоянии $f = 1$ от центра проекции и проходящая параллельно картинной плоскости (проецирования). Проекция F относится к классу проективных преобразований, сохраняющих коллинеарность точек, и часто называется прямым линейным преобразованием (DLT — Direct Linear Transform). Преобразование DLT основано на модели камеры-обскуры и не учитывает нелинейные искажения оптики:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_u \mathbf{r}_1^T + u_0 \mathbf{r}_3^T & a_u t_x + u_0 t_z \\ a_v \mathbf{r}_2^T + v_0 \mathbf{r}_3^T & a_v t_x + v_0 t_z \\ \mathbf{r}_3^T & t_z \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где \mathbf{r}_i^T — транспонированный i -й вектор-столбец матрицы поворотов R .

В общем случае для реконструкции поля скорости в методе Stereo PIV достаточно знать все коэффициенты матрицы F . Существует несколько методов оценивания ее коэффициентов f_{ij} . Самый простой метод состоит в решении системы линейных уравнений относительно f_{ij} для фиксированного количества опорных точек (x_i, y_i, z_i) в трехмерном пространстве и измеренных координат (u_i, v_i) опорных точек на изображении. Для этого необходимо иметь минимум шесть опорных точек [13]. Причем для определения двумерного варианта преобразования F достаточно иметь в распоряжении четыре опорные точки. Уменьшить влияние ошибки, связанной с необходимостью измерять координаты опорных точек, можно путем увеличения количества точек, при этом система (1) становится переопределенной и коэффициенты матрицы находятся методами условной минимизации. Отмечено, что если все опорные точки лежат в одной плоскости, то существует неопределенность в нахождении коэффициентов DLT-матрицы. Методом, наиболее устойчивым к ошибкам измерения, является подход на основе минимизации расстояния между измеренными проекциями исходных точек (u_i, v_i) и (U_i, V_i) , рассчитанными с использованием (1) (см. [9]):

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N [(u_i - U_i)^2 + (v_i - V_i)^2]. \quad (3)$$

Функционал (3) минимизируется нелинейной процедурой минимизации Левенберга–Марквардта [14] в несколько итераций. Оценка параметров на первом шаге берется из решения, полученного методом наименьших квадратов (МНК) для линеаризованной части выражения (3).

Для учета оптической дисторсии при калибровке камеры может использоваться полиномиальное преобразование (PLN) следующего вида:

$$\begin{aligned} x' = & a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 z + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2 + a_7 xz + a_8 yz + a_9 z^2 + \\ & + a_{10} x^3 + a_{11} x^2 y + a_{12} xy^2 + a_{13} y^3 + a_{14} x^2 z + a_{15} yz^2 + a_{16} y^2 z + a_{17} xz^2 + a_{18} yz^2. \end{aligned}$$

Полиномиальное преобразование имеет линейную зависимость от параметров a_0, \dots, a_{18} , поэтому для их оценки применим метод наименьших квадратов. Оптические искажения могут возникать вследствие

радиальной дисторсии линз, а также кривизны поверхностей раздела сред и неоднородностей в коэффициенте преломления для оптического пути, поскольку при применении PIV-метода часто приходится сталкиваться с измерением в сложных условиях.

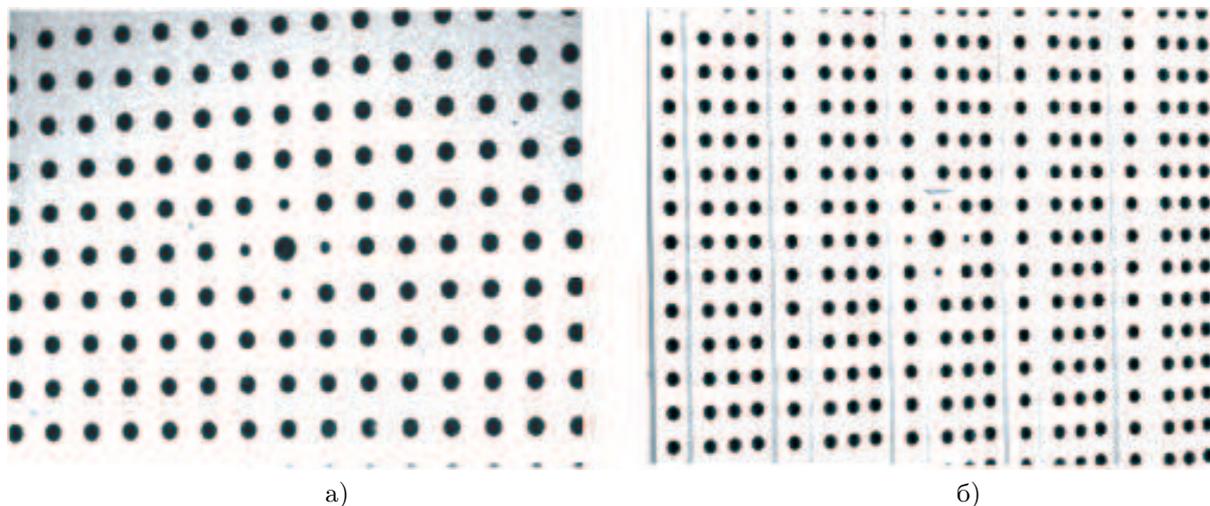


Рис. 2. Пример изображения одноуровневой калибровочной мишени с правой камеры (а) и трехуровневой калибровочной мишени с левой камеры (б)

Определение опорных точек для калибровки камер в Stereo PIV измерениях производится по специально изготовленной калибровочной мишени. Мишень, применявшаяся в данной работе, представляет собой поверхность или набор параллельных плоскостей с нанесенными маркерами в узлах декартовой координатной сетки. В общем случае в машинном зрении калибровка камеры осуществляется по объектам сцены с заранее известной геометрией. В качестве объектов могут рассматриваться точки, отрезки и углы. Для выделения начала координат используется маркер большего диаметра. Для выделения осевых опорных точек соответствующие им маркеры имеют меньший диаметр по сравнению с остальными маркерами. На рис. 2 приведены два изображения мишени: с компланарным и трехуровневым расположением маркеров.

Калибровка камеры по мишени с компланарным расположением точек требует ее точного перемещения в перпендикулярном к плоскости лазерного ножа направлении. Достоинством трехуровневой мишени является то, что перемещения мишени не требуется и, следовательно, возможна калибровка по одному изображению. Точность выполнения центра маркеров (расстояния между маркерами) и задания плоскости мишени зависит от технологического процесса изготовления мишени. В среднем погрешность расположения центра маркера составляет 0,1 мм.

В табл. 1 указаны названия, авторы и краткое описание общедоступных реализаций процедур калибровки камеры.

3.2. Декомпозиция матрицы центральной проекции. В некоторых случаях необходимо знать не только коэффициенты f_{ij} , но и сами значения параметров калибровки. Например, для использования метода стереорекострукции скорости на основе репроекции изображений, а также метода коррекции рассогласования плоскости мишени и плоскости лазерного ножа, которые будут рассмотрены ниже, необходимо знать углы обзора камеры.

Пусть поворот системы координат камеры относительно глобальной системы координат задается последовательными поворотами на углы Эйлера: φ — относительно оси OX , θ — относительно нового положения оси OY и γ — относительно нового положения (после двух поворотов) оси OZ . Картинная плоскость камеры расположена перпендикулярно оптической оси. Тогда элементы матрицы поворотов R выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \theta \cos \gamma, & r_{12} &= \sin \varphi \sin \theta \cos \gamma - \cos \varphi \sin \gamma, & r_{13} &= \cos \varphi \sin \theta \cos \gamma + \sin \varphi \sin \gamma, \\ r_{21} &= \cos \theta \sin \gamma, & r_{22} &= \sin \varphi \sin \theta \sin \gamma + \cos \varphi \cos \gamma, & r_{23} &= \cos \varphi \sin \theta \sin \gamma - \sin \varphi \cos \gamma, \\ r_{31} &= -\sin \theta, & r_{32} &= \sin \varphi \cos \theta, & r_{33} &= \cos \varphi \cos \theta. \end{aligned} \tag{4}$$

В записи матрицы F в выражении (2) применяется нормировка $f_{31}^2 + f_{32}^2 + f_{33}^2 = \mathbf{r}_3^T \mathbf{r}_3 = 1$. Таким образом, для определения параметров калибровки произвольной DLT-матрицы необходимо сначала про-

Таблица 1

Сводная таблица доступных реализаций процедур калибровки камеры

№	Название и авторы	Описание (формат, разработка, ссылка)
1	Tsai camera calibration software R. Willson	C CMU 93-95 http://www.cs.cmu.edu/~rgw/TsaiCode.html
2	Camera calibration toolbox for Matlab J. Heikkila	MATLAB University of Oulu 96-97 http://www.ee.oulu.fi/~jth/calibr/
3	Camera calibration toolbox for Matlab Jean-Yves Bouguet	MATLAB CALTECH 96-98 http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
4	Microsoft easy camera Calibration Tool Z. Zhang	Bin Microsoft Corporation 98-99 http://research.microsoft.com далее искать по названию (использует Microsoft Vision SDK)
5	Калибровка камеры в OpenCV Jean-Yves Bouguet	C++ Intel Corporation et al. 1999-2005 www.intel.com/technology/computing/opencv/
6	GML camera calibration toolbox В. Вежнев, А. Велижев	C#, C++, MATLAB МГУ 2004-2005 http://graphics.cs.msu.ru/en/research/calibration/index.html (использует OpenCV)
7	DLR CalDe and DLR CalLab Klaus Strobl et al.	IDL DLR -2006 http://www.robotic.dlr.de/callab/ (использует IDL virtual machine http://www.itvis.com/idlvm/)

вести ее перенормировку. Пусть $\mathbf{f}_1^T = (f_{11}, f_{12}, f_{13})$, $\mathbf{f}_2^T = (f_{21}, f_{22}, f_{23})$ и $\mathbf{f}_3^T = (f_{31}, f_{32}, f_{33})$. Тогда из (2) и свойств ортогональности R следует, что

$$\begin{aligned}
 u_0 &= \mathbf{f}_1^T \mathbf{f}_3, & v_0 &= \mathbf{f}_2^T \mathbf{f}_3, & a_u &= \pm |\mathbf{f}_1 \times \mathbf{f}_3|, & a_v &= \pm |\mathbf{f}_2 \times \mathbf{f}_3|, \\
 t_x &= \frac{1}{a_u} (f_{14} - u_0 t_z), & t_y &= \frac{1}{a_v} (f_{24} - v_0 t_z), & t_z &= f_{14}, \\
 \mathbf{r}_1^T &= \frac{1}{a_u} (\mathbf{f}_1^T - u_0 \mathbf{f}_3^T), & \mathbf{r}_2^T &= \frac{1}{a_v} (\mathbf{f}_2^T - v_0 \mathbf{f}_3^T), & \mathbf{r}_3^T &= \mathbf{f}_3^T.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Соотношения для углов обзора нетрудно определить из соотношений (4) и последней строки в (5): $\operatorname{tg} \varphi = \frac{f_{32}}{f_{33}}$, $\sin \theta = -f_{31}$, $\operatorname{tg} \gamma = \frac{a_u f_{21} - v_0 f_{31}}{a_v f_{11} - u_0 f_{31}}$. Все полученные параметры применимы только для обычной камеры, где $\alpha = 0$. Определение параметров калибровки для Шаймпфлюг-камеры можно найти в работе [15]. Известны еще два метода вычисления углов обзора камер [16] (они основываются на изменении приращения x -координаты относительно приращения координаты z : $\operatorname{tg} \theta = \frac{dx}{dz}$).

3.3. Распознавание образов опорных точек и привязка к координатной сетке. Распознавание образов опорных точек на изображении выполнено путем бинаризации с динамическим порогом исходного изображения калибровочной мишени. После бинаризации осуществлялся поиск связных областей, соответствующих маркерам. Фильтрация маркеров по заданным критериям оставляет только требуемые опорные точки. Для субпиксельного определения центров опорных точек на изображении в работе при-

менялось два метода: вычисление центра масс (ЦМ) по элементам, принадлежащим связной области, и локализация центра по корреляции с шаблоном маркера (КШ) [17]. Шаблон маркера представляет собой область круга с ненулевой интенсивностью центра маркера на исходном изображении и нулевой интенсивностью во внешней области. Диаметр шаблона маркера вычисляется по диаметру маркера на исходном изображении.

Привязка найденных положений опорных точек к декартовой координатной сетке — одна из важных задач, решаемых во время процедуры калибровки. Привязка осложняется значительными линейными искажениями координатной сетки опорных точек при наблюдении с малых расстояний $d_0 < 0,5$ м под большими углами $\theta > 45^\circ$, а также тем, что плоскость калибровочной мишени может быть повернута на произвольный угол относительно нормали к поверхности мишени. В этом случае сохраняются только линии, состоящие из опорных точек, и не сохраняется параллельность соседних линий.

Для решения задачи привязки к координатной сетке использовался подход поэтапной репроекции опорных точек на изображении в глобальную систему координат эксперимента $OXYZ$, нормированную на расстояние между опорными точками, начиная с центрального маркера на периферию изображения. В этой новой системе координат соседние линии из опорных точек становятся практически параллельными в локальной области и координаты опорных точек близки к целочисленным значениям (рис. 3б, г). Центральный маркер, соответствующий началу координат, и четыре осевых маркера, ближайших к центральному, используются для оценки предварительной модели камеры по компланарной мишени (рис. 3б). Известно [13], что для оценки параметров гомографии достаточно четырех опорных точек. В нашем случае используется пять опорных точек, что достаточно для определения параметров модели в окрестности этих точек. Найденная предварительная модель используется для репроекции блока опорных точек размером 11×11 с центром в начале координат и привязки их к глобальной системе координат (рис. 3г). Вторая предварительная модель камеры рассчитывается по точкам из блока 11×11 точек. Экспериментально установлено, что для используемых калибровочных мишеней размером матрицы менее 25×25 точек двух предварительных моделей достаточно для привязки всех опорных точек мишени к декартовой сетке глобальной системы координат эксперимента $OXYZ$.

Рассмотрим привязку опорных точек на изображении (u_i, v_i) к координатной сетке после их репроекции в точки (x_i, y_i) по предварительной модели камеры (рис. 3а, в). Ниже представлен метод разбиения опорных точек калибровочной мишени по столбцам, разделение по строкам осуществляется аналогично. Все точки располагаются по возрастанию x -координаты. На рис. 3 такой массив выглядит в виде ступеней. Далее рассматриваются расстояния Δx между соседними опорными точками в этом массиве. На рис. 3 эти

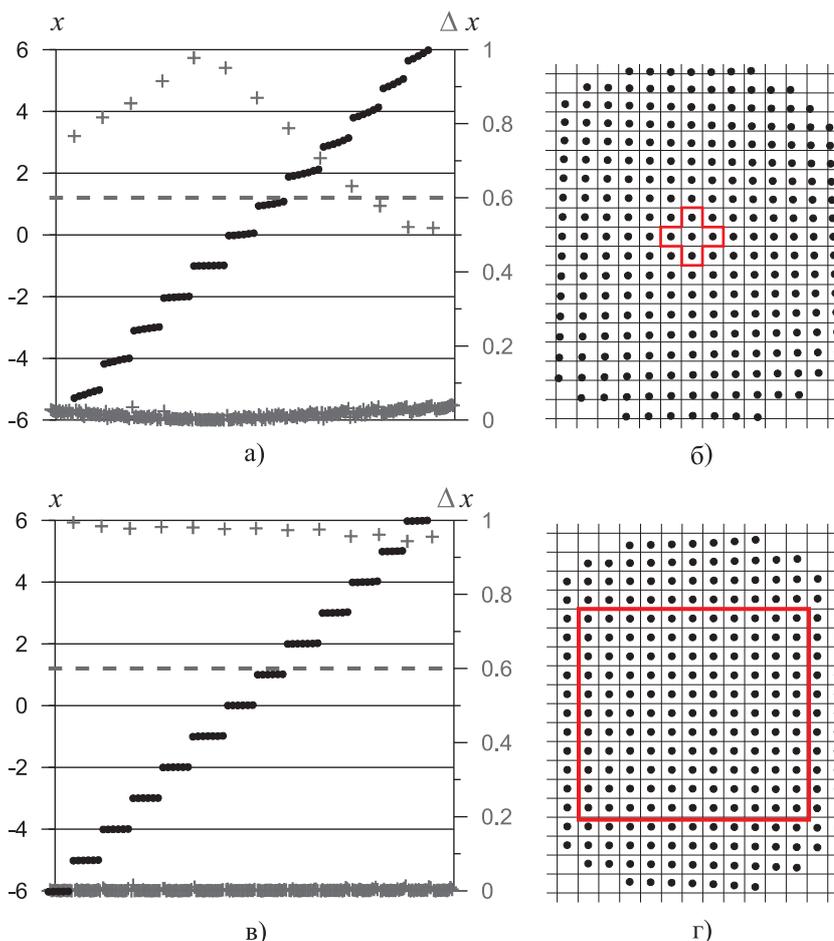


Рис. 3. Привязка к координатной сетке; x -координаты опорных точек, отсортированных по возрастанию, — черные точки, расстояние между опорными точками Δx — серые перекрестия, порог разделения столбцов — серая штрих-линия:
 а) и б) для предварительной модели по 5 точкам;
 в) и г) для предварительной модели по 11×11 точкам

расстояния изображены в виде серых перекрестий. При переходе от столбца к столбцу имеет место скачок в значении Δx . В идеальном случае полного совпадения предварительной модели с моделью камеры этот скачок равен 1. При недостаточном количестве точек, использованных для построения модели, уровень Δx уменьшается с увеличением расстояния от начала координат. Пороговым критерием по уровню Δx можно разделять отдельные столбцы из маркеров. Например, для разделения столбцов из маркеров, репроецированных предварительной моделью на рис. 3а, можно использовать уровень 0,4, а для столбцов из маркеров, репроецированных второй предварительной моделью на рис. 3в, подойдет уровень 0,8. Таким образом, увеличение количества опорных точек, использованных для построения предварительной модели, ведет к упрощению разделения маркеров изображения. Указанный подход также использован для привязки маркеров трехуровневой мишени к декартовой координатной сетке. В этом случае оптимальный пороговый уровень определяется равенством $\Delta x = 0,4$.

Моделирование и отладка алгоритма распознавания образов маркеров и привязки их к координатной сетке проводились по искусственным изображениям, полученным методом трассировки лучей в редакторе Now3D Professional. При этом учитывалась реальная геометрия, типичные параметры камеры, а также использовались близкие к реальным образцам 3D-модели компланарной и трехуровневой калибровочных мишеней.

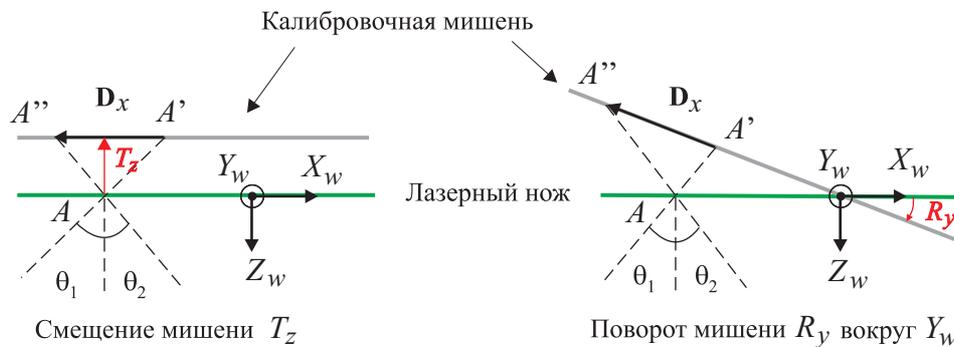


Рис. 4. Возможные случаи потери выравнивания калибровочной мишени и лазерного ножа

3.4. Метод коррекции калибровки, автокалибровка. Один из источников погрешности при проведении экспериментов с использованием метода Stereo PIV связан с рассогласованием плоскостей мишени и лазерного ножа [17–19]. На рис. 4 показаны возможные типы рассогласования, связанные с поворотом мишени относительно одной из осей, а также с параллельным сдвигом мишени относительно плоскости лазерного ножа.

Коррекция достигается вычислением диспаратности \mathbf{D}_x между сопряженными точками A' и A'' , т.е. расстоянием между параллельными проекциями точки A в плоскости измерения на плоскость калибровочной мишени. В данной работе предлагается численная процедура коррекции калибровки.

Численная процедура коррекции состоит из следующих операций. Стереопара изображений, фиксирующая область потока в один и тот же момент времени, репроецируется в глобальную систему координат эксперимента $OXYZ$. На следующем шаге кросскорреляционным алгоритмом вычисляется поле значений диспаратности для сопряженных точек на регулярной сетке $\mathbf{D}(x, y)$. Компоненты поля диспаратности аппроксимируются плоскостью $\mathbf{D}(x, y) \sim ax + by + c$, и по коэффициентам аппроксимации рассчитываются параметры коррекции:

$$\begin{cases} R_y = \frac{\partial \mathbf{D}_x}{\partial x} \frac{1}{\operatorname{tg} \theta_1 + \operatorname{tg} \theta_2}, & \begin{cases} T_z = \frac{\mathbf{D}_x(x_0, y_0)}{\operatorname{tg} \theta_1 + \operatorname{tg} \theta_2} \frac{w_{\text{mdl}}}{w_{\text{img}}}, \\ T_y = \mathbf{D}_y(x_0, y_0) \frac{h_{\text{mdl}}}{h_{\text{img}}}. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь (x_0, y_0) — координаты принципиальной точки, θ_1, θ_2 — горизонтальные углы обзора камер, $w_{\text{mdl}}, w_{\text{img}}, h_{\text{mdl}}, h_{\text{img}}$ — ширина, высота изображения в глобальной системе координат и в системе координат, связанной с изображением. В выражении (6) смещения T_z, T_y измеряются в метрах, а повороты R_x, R_y — в радианах.

Применение коррекции калибровки камеры осуществляется поворотом и смещением опорных точек калибровочной мишени в системе координат эксперимента на углы R_x, R_y и расстояние T_z соответственно. Вертикальный диспаратитет \mathbf{D}_y по величине обычно меньше горизонтального \mathbf{D}_x . Он образуется вследствие

расположения камер в стереосистеме на различной высоте, например при отклонении балки крепления камер от горизонтального положения, а его значение может использоваться как дополнительная корректировка оптической стереосистемы. Вертикальная составляющая диспаратета может быть компенсирована симметричным вертикальным смещением опорных точек на величину $T_y/2$ для левой камеры и $-T_y/2$ для правой камеры. В данной работе было предложено использование коррекции модели камеры путем последовательного приближения для того, чтобы устранить влияние помех и накопления ошибок в процессе измерений.

Применение в эксперименте описанного выше подхода имеет ограничение в применимости по ширине лазерного ножа. Он плохо работает для измерений с лазерным ножом большой толщины. Это связано с увеличением случайной ошибки при кросскорреляции репроецированных изображений такого эксперимента. В этом случае можно применить метод усреднения корреляционных плоскостей для получения среднего поля диспаратности, как, например, при обработке данных экспериментов с микропотоками [20]. Кроме того, при широком лазерном ноже можно применить метод [21], который заключается в оценке диспаратета по наиболее ярким трассерам стереопары.

3.5. Анализ погрешности калибровки. При проведении Stereo PIV эксперимента необходимо учитывать возможную ошибку калибровки камеры. Эта ошибка вносит вклад в общую погрешность измерения скорости. Возможные неточности калибровки могут существенно снизить качество получаемых данных. Основные составляющие погрешности калибровки: недостатки в модели камеры, например модель камеры-обскуры не учитывает дисторсию оптики, и ошибка измерения центров опорных точек на изображении. Вторая составляющая может иметь несколько причин:

- неортогональность ПЗС-матрицы цифровой камеры (когда элементы соседних строк матрицы расположены не строго один под другим);
- ошибка считывания сигнала с матрицы, известная как дрожание строк, имеет случайный характер;
- асимметрия перспективной проекции круглого маркера на плоскость изображения [22];
- точность метода определения центра маркера;
- механическая точность изготовления калибровочной матрицы.

Ошибка при рассогласовании плоскостей проявляется только для неоднородных полей скорости в виде неверного определения начала вектора скорости и значения его модуля [18]. Величина ошибки определяется степенью рассогласования и величиной градиента скорости в области измерения. Таким образом, уровень ошибки будет зависеть не только от точной настройки измерительной системы, но также и от типа измеряемого потока. Для некоторых потоков этой ошибкой можно пренебречь по сравнению со случайной ошибкой кросскорреляционного алгоритма [1].

В настоящей работе ошибка калибровки оценивалась как среднеквадратичное отклонение измеренных координат от вычисленных по модели камеры, как в выражении (3), отдельно для каждой координаты и совместно.

4. Методы стереорекострукции полей скорости. В этом разделе обсуждаются два подхода к реконструкции трехкомпонентного поля скорости. Каждый из методов имеет свои достоинства и ограничения, которые будут рассмотрены ниже. Указанные методы описаны в [16, 17, 24]. Обсуждаемые методы стереорекострукции мгновенных полей скорости, а также процедура калибровки камеры, описанная в разделе 3, были реализованы в качестве алгоритмов обработки данных в программном обеспечении ActualFlow измерительной системы ПОЛИС, разработанной в Институте теплофизики СО РАН и основанной на оптических методах измерения PIV, Stereo PIV, PTV, LIF и PLIF [23].

4.1. Метод репроекции изображений. Рассмотрим вариант стереорекострукции с репроекцией изображений (рис. 5). Впервые данный алгоритм был описан в работе [25].

На вход алгоритма подаются две пары изображений частиц для правой и левой камеры и параметры калибровки камер. Далее изображения восстанавливаются в глобальной системе координат эксперимента $OXYZ$ посредством интерполяции. Репроецированные изображения не содержат проективных искажений; таким образом, масштабный коэффициент для всех точек такого изображения остается постоянным. Для каждой пары изображений в стереопаре кросскорреляционным алгоритмом [1] определяются смещения частиц, из которых после масштабирования полей скорости и дальнейших геометрических преобразований для каждой измерительной точки (7) восстанавливается итоговый трехкомпонентный вектор скорости в плоскости измерения:

$$dx = \frac{dx_1 \operatorname{tg} \theta_2 - dx_2 \operatorname{tg} \theta_1}{\operatorname{tg} \theta_2 - \operatorname{tg} \theta_1}, \quad dy = \frac{dy_1 \operatorname{tg} \beta_2 + dy_2 \operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_1 + \operatorname{tg} \beta_2}, \quad dz = \frac{dx_1 - dx_2}{\operatorname{tg} \theta_2 - \operatorname{tg} \theta_1}, \quad (7)$$

где (dx, dy, dz) — искомое смещение, (dx_1, dy_1) и (dx_2, dy_2) — репроецированные поля смещений частиц, $\theta_1 > 0$, $\theta_2 < 0$ и β_1, β_2 — локальные горизонтальные и вертикальные углы обзора камер соответственно

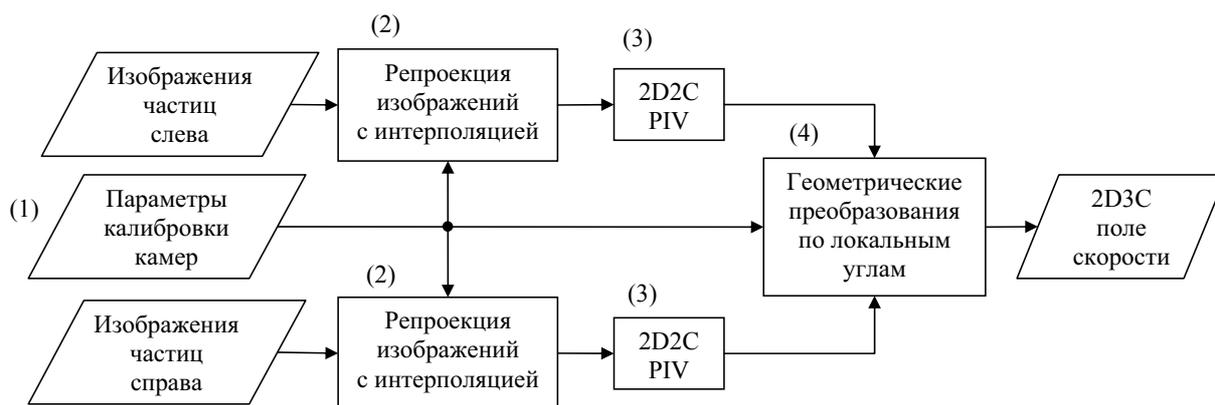


Рис. 5. Схема метода стереорекострукции поля скорости с репроекцией изображений

(зависят от x , y в плоскости измерения). Из рис. 5 следует, что процесс реконструкции проходит в четыре этапа. Номер этапа на рисунке показан в скобках. По времени этапы 2 и 3 наиболее продолжительные. На этапе 4 параметры калибровки камер используются для вычисления локальных углов обзора. Видно, что при изменении калибровки камеры, например после коррекции калибровки, необходимо заново пройти этапы 2 и 3. Это неоптимально по времени при обработке больших массивов данных (1000 и более стереопар), поэтому при использовании данного метода реконструкции необходимо вначале рассчитать параметры калибровки оптической стереосистемы. Преимуществами данного метода являются: хорошее пространственное разрешение, вычисление смещения трассеров по изображениям с однородным масштабным коэффициентом и простота “перемещения” ошибочных векторов из стереопроекций в итоговое 2D3C-поле скорости. К недостаткам алгоритма можно отнести низкую скорость обработки вследствие использования интерполяции изображения.

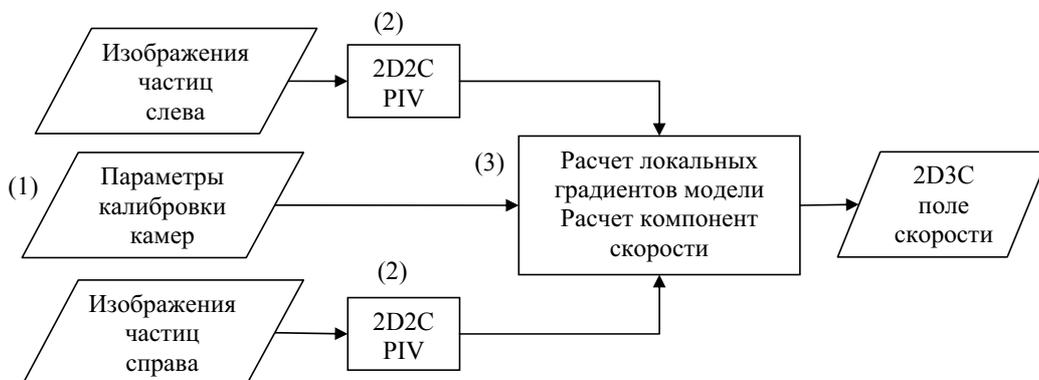


Рис. 6. Схема метода стереорекострукции по локальным градиентам модели камеры

4.2. Метод локальных градиентов модели камеры. Рассмотрим вариант стереорекострукции по методу локальных градиентов модели камеры (рис. 6). Впервые данный алгоритм был описан в работе [8].

Естественным ограничением этого метода является определение численного значения матрицы Якоби для преобразования координат F в любой точке измерения. Таким образом, для рассматриваемого метода подходят модели камеры, для которых вычислимы частные производные по координатам x , y и z .

Метод подразумевает расчет поля скорости кросскорреляционным алгоритмом [1] по исходным изображениям с искажением перспективы (этап 2 на рис. 6). Поэтому разные точки измерения, выбранные на изображении, при одинаковом размере расчетной области имеют разное физическое пространственное разрешение. Расчетная область, располагающаяся на границе изображения ближе к камере, будет соответствовать большему физическому объему и наоборот. Добиться максимального пространственного разрешения в измерениях на ближней границе изображения возможно, если камеры стереосистемы располагаются по разные стороны от лазерного ножа [6] — так называемая оппозитная конфигурация. В этом случае достигается еще одно преимущество — обе камеры работают в режиме прямого рассеяния и

собирают максимальное количество света [25].

Итоговое поле скорости вычисляется посредством приближенного решения переопределенной системы из четырех линейных уравнений с тремя неизвестными, связывающей приращение в глобальной системе координат эксперимента с приращениями в системах координат изображений:

$$d\mathbf{u}_c = F^c(\mathbf{x} + d\mathbf{x}) - F^c(\mathbf{x}) \Rightarrow d\mathbf{u}_c = \nabla F^c(\mathbf{x})d\mathbf{x}, \tag{8}$$

где $d\mathbf{u}_c = (du_c, dv_c)$ — смещение частиц в точке измерения $\mathbf{x} = (x, y, z)$ на изображении для камеры c , $\nabla F^c(\mathbf{x})$ — матрица Якоби преобразования F в точке \mathbf{x} для камеры c и $d\mathbf{x} = (dx, dy, dz)$ — искомое значение смещения. Приближенное решение ищется методом наименьших квадратов, например приведением системы (8) к нормальному виду. По остатку процедуры минимизации можно судить об ошибке реконструкции скорости (так, типичное значение остатка составляет 0,1–0,5 пикс [24]).

Значения смещений $d\mathbf{u}_c$ вычисляются билинейной интерполяцией полей скорости, полученных на этапе 2. Это определяет два недостатка данного алгоритма: сглаживание или дополнительная модуляция смещения, которая приводит к ухудшению пространственного разрешения, и затрудняется учет ошибочных векторов, которые перемещаются из стереопроекций в итоговое 2D3C-поле скорости. Из достоинств данного алгоритма можно отметить простоту реализации, быструю скорость расчета данных и меньшее количество промежуточных данных вследствие обработки в три этапа вместо четырех (рис. 5, 6).

4.3. Анализ погрешности метода стереорекострукции. Рассмотрим погрешность измерения компонент скорости при стереорекострукции на примере метода локальных углов для случая $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = -45^\circ$, $\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$. В этом случае выражение (7) упрощается: $dx \approx \frac{dx_1 + dx_2}{2}$; $dy \approx \frac{dy_1 + dy_2}{2}$; $dz \approx \frac{dx_2 - dx_1}{2}$. Знак приближения здесь использован вследствие пренебрежения локальностью углов обзора. Если рассматривать среднеквадратичную ошибку алгоритма, то с учетом правила сложения ошибок, масштабного коэффициента M и одинаковой случайной ошибки кросскорреляционного алгоритма σ_{corr} для измерений 1 и 2 получим: $dx_{\text{rms}} \approx M\sigma_{\text{corr}}$; $dy_{\text{rms}} \approx \frac{M}{\sqrt{2}}\sigma_{\text{corr}}$; $dz_{\text{rms}} \approx M\sigma_{\text{corr}}$. Из последней оценки следует, что случайная ошибка Stereo PIV измерений для компонент dx , dz является такой же, как и для плоскостных измерений методом 2D PIV, а для компоненты dy в $\sqrt{2}$ раз меньше вследствие усреднения по двум независимым результатам измерений. В работе [16] на синтетических и проекционных тестах показано, что модуляцией частотной характеристики сигнала скорости посредством алгоритмов стереорекострукции можно пренебречь.

5. Тестирование методов. Тестирование представленных методов выполнено на данных эксперимента по измерению скорости жидкости в поперечном сечении трубы диаметром $D = 40$ мм при ламинарном режиме течения $Re = 3000$, где Re — число Рейнольдса. Детали и результаты эксперимента можно найти в [10]. Первичные данные эксперимента для теста E: 80 стереопар изображений частиц и набор стереопар изображений калибровочной мишени в пяти положениях по оси Z были получены в рамках международного тест-симпозиума PIV Challenge 2005 [26], в котором участвовали авторы работы. Данные эксперимента доступны в Интернете по адресу <http://www.pivchallenge.org/>.

Ламинарное течение представляет собой хороший тест для PIV-алгоритмов, так как в этом случае собственные флуктуации скорости потока равны нулю и среднеквадратичное отклонение скорости от среднего значения напрямую показывает случайную погрешность численного метода. При ламинарном режиме течения в трубе только осевая компонента скорости U_z является ненулевой, поэтому по средней скорости компонент в плоскости измерения U_x , U_y можно судить о систематической погрешности алгоритма.

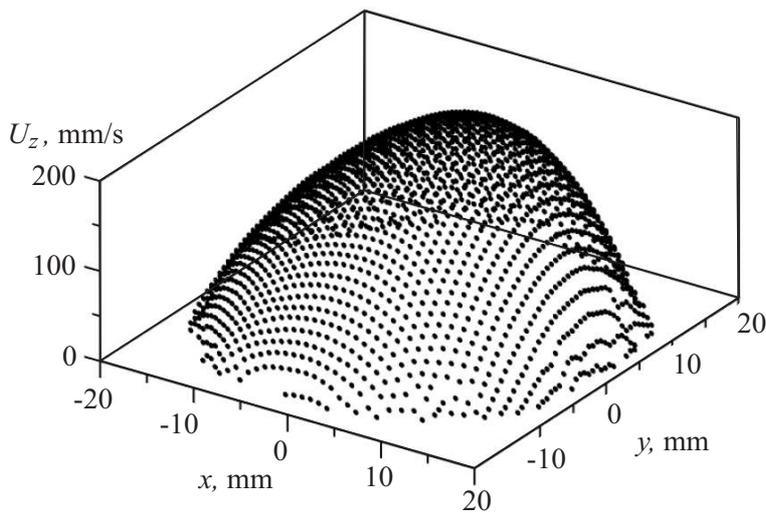


Рис. 7. 3D-профиль U_z компоненты скорости в трубе в измерительном сечении (тест E, PIV Challenge 2005 [26])

Общий вид 3D-профиля скорости в измерительном сечении можно видеть на рис. 7. Асимметрия профиля скорости на рис. 7 связана с влиянием кориолисовых сил, а также с другими факторами, например с конвективным теплообменом и несоосностью сегментов трубы [10].

5.1. Результаты калибровки камеры. В этом разделе приведены результаты работы процедуры калибровки камеры для эксперимента, описанного выше. При тестировании созданного алгоритма калибровки камеры варьировались следующие параметры: количество z -плоскостей, модель камеры, тип метода субпиксельного определения центра маркера, использование алгоритма линейной и нелинейной оптимизации. В табл. 2 суммированы результаты теста для изображений калибровочной мишени с левой камеры. С третьего по седьмой столбец знаком \times отмечены использованные z -плоскости, в заголовке показаны соответствующие им значения z в миллиметрах. Качество проведенной калибровки оценивалось по величине среднеквадратичной ошибки $e_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{N}}$ в пикселях, см. (3). В последних четырех столбцах указаны ошибки для двух моделей камеры и двух методов уточнения центра. Число без скобок в ячейках этих столбцов соответствует нелинейной оптимизации, в скобках указано значение ошибки для случая линейной минимизации.

Таблица 2

Результат тестирования процедуры калибровки левой камеры (тест E)

п изобр.	N точек	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	DLT/ЦМ	DLT/КШ	PLN/ЦМ	PLN/КШ
2	501	\times		\times			1,603 (1,604)	1,608 (1,609)	1,181 (1,181)	1,171 (1,171)
3	756	\times		\times		\times	1,619 (1,62)	1,622 (1,623)	1,193 (1,194)	1,178 (1,182)
4	1011	\times	\times	\times		\times	1,622 (1,628)	1,624 (1,627)	1,191 (1,2)	1,18 (1,186)
5	1268	\times	\times	\times	\times	\times	1,628 (1,629)	1,627 (1,628)	1,194 (1,197)	1,18 (1,183)

Следует отметить, что значение ошибки, полученное для данного эксперимента, примерно в 1,5–2 раза превышает типичное значение ошибки $e_{\text{rms}} \approx 0,8$ пикс для калибровки камеры в реальном эксперименте. Это связано с достаточно сильной дисторсией сверху и снизу изображения вследствие влияния кривизны поверхности трубы, так как калибровочный объект в эксперименте [10] помещался внутрь прозрачного сегмента трубы, в котором проводились измерения.

Из табл. 2 следует, что с увеличением количества z -плоскостей ошибка калибровки увеличивается незначительно, особенно для полиномиального преобразования, хотя количество использованных маркеров увеличивается практически в три раза, а калиброванный объем пространства увеличивается вдвое. Нелинейная оптимизация в данном случае уменьшает ошибку в среднем на 0,4% по сравнению с оптимизацией МНК. Применение различных методов уточнения положения центра маркеров для двух моделей камеры дает противоречивые результаты. Для DLT-модели наблюдается небольшое увеличение ошибки на 0,3% для метода корреляции с шаблоном маркера (КШ) по сравнению с расчетом по методу центра масс (ЦМ). Для полиномиального преобразования (PLN), наоборот, происходит уменьшение ошибки на 1,3%. Из литературы [17] известно, что метод КШ позволяет уменьшить ошибку определения центра маркера по сравнению с простым методом ЦМ.

Все результаты тестирования, представленные далее, используют калибровку камеры по пяти плоскостям с моделью камеры PLN и методом уточнения центра КШ.

Для данного набора экспериментальных изображений была проведена коррекция выравнивания плоскости калибровочной мишени относительно положения плоскости лазерного ножа (см. раздел 3.4). Эффект потери выравнивания в данном случае заметен на величине систематической ошибки поперечной компоненты средней скорости U_x (рис. 8а), которая, как было замечено выше, должна быть нулевой во всех точках измерения. В данном случае без использования процедуры автокалибровки наблюдается изменение значения U_x вдоль оси x в пределах $-0,1 \div 0,1$ пикс, что соответствует смещению плоскости лазерного ножа на величину $T_z = 0,1$ мм относительно плоскости калибровочной мишени по направлению

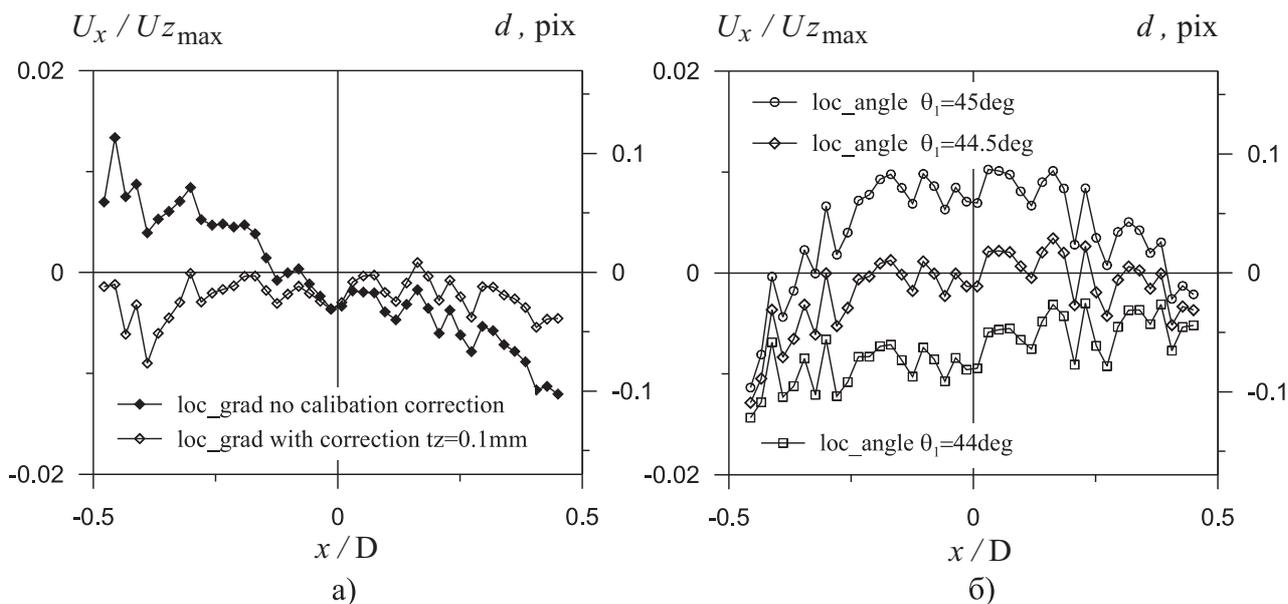


Рис. 8. Профиль поперечной компоненты U_x средней скорости в сечении $y = 0,22$ мм. Для стереорекострукции скорости методом локальных градиентов модели камеры (а) показано влияние рассогласования плоскостей калибровочной мишени и лазерного ножа на значение U_x . Для стереорекострукции скорости методом репроекции изображений (б) показано влияние значения угла обзора θ_1 при $\theta_2 = 45^\circ$ на величину U_x , рассогласование скорректировано

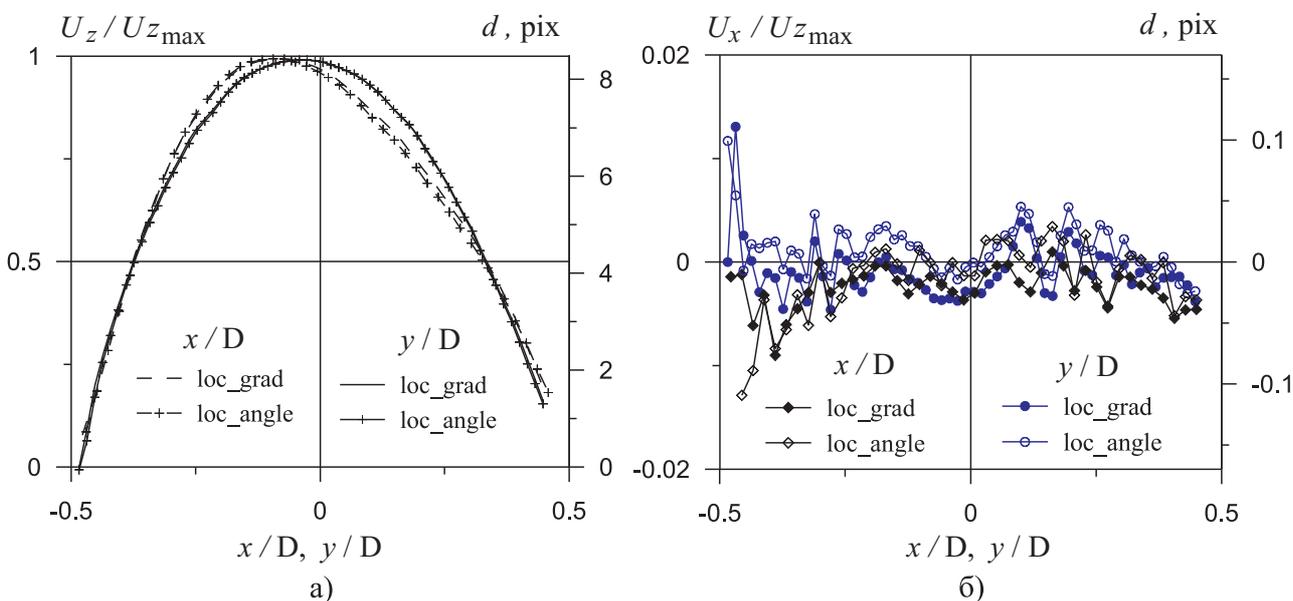


Рис. 9. Профили средней скорости осевой компоненты U_z (а), поперечной компоненты U_x (б) для двух методов стереорекострукции скорости в сечениях $x = -1,44$ мм, $y = 0,22$ мм

течения потока. Следует отметить, что такое рассогласование является достаточно малым. Это связано со специальными усилиями авторов работы [10] по обеспечению наилучшего выравнивания плоскостей. Обычно в Stereo PIV экспериментах приходится иметь дело со смещениями вплоть до 1 мм. Дополнительно на рис. 8б показано влияние значения угла обзора θ_1 при $\theta_2 = 45^\circ$ на величину U_x . Видно, что изменение величины угла обзора всего на $0,5^\circ$ приводит к ошибке измерения поперечной компоненты скорости на 1%. Это говорит о том, что угол обзора камеры при использовании метода стереорекострукции скорости через репроекцию изображений должен быть измерен или вычислен довольно точно.

5.2. Результаты стереорекострукции полей скорости. Данные эксперимента обработаны дву-

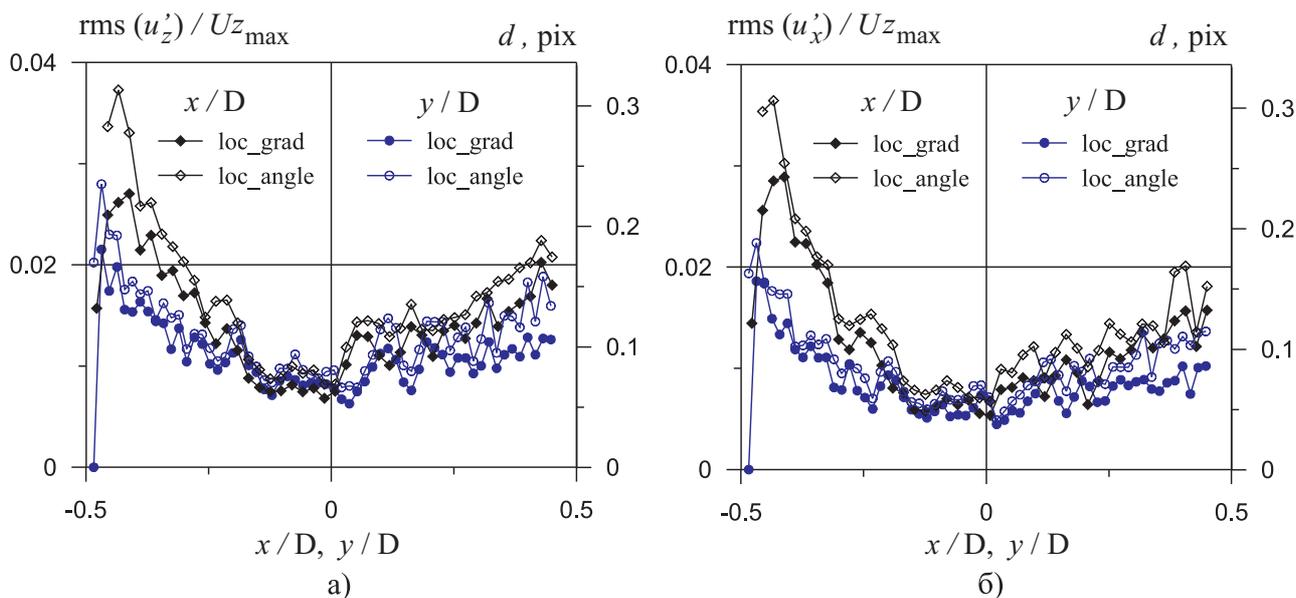


Рис. 10. Случайная ошибка для осевой компоненты скорости u_z (а), поперечной компоненты скорости u_x (б) для двух методов стереорекострукции скорости в сечениях $x = -1,44$ мм, $y = 0,22$ мм

мя типами алгоритмов стереорекострукции полей скорости (см. раздел 4). Итоговые поля скорости для двух методов рассчитаны на одной и той же сетке в глобальной системе координат эксперимента размером 43×61 векторов. При обработке экспериментальных изображений частиц и изображений, полученных методом репроекции, использовался адаптивный кросскорреляционный алгоритм CWS [1] с интерполяцией изображения кубическим сплайном. Расчет поля скорости проходил в две итерации с начальным размером расчетной области 64 пикс и перекрытием областей 50 %, конечный размер области — 32 пикс и перекрытие — 50 %. Для изображений частиц, полученных путем репроекции, применялось маскирование внешних областей трубы с установкой средней интенсивности по изображению во внешней области трубы. На рис. 9а показан профиль средней скорости для осевой компоненты в вертикальном и горизонтальном сечениях. В вертикальном сечении профиль скорости показывает хорошее совпадение для двух методов стереорекострукции. В горизонтальном сечении есть небольшое различие: 2 % в диапазоне $\frac{x}{D} = 0 \div 0,25$. Это связано с малым количеством точек измерения (80 мгновенных полей скорости), использованных для вычисления среднего поля скорости с учетом ошибочных векторов, не вошедших в усреднение. На рис. 9б показаны профили скорости для поперечной компоненты скорости, нормированной на максимальное значение осевой скорости $U_{z_{\max}}$. Этот график напрямую показывает систематическую ошибку измерения поперечной компоненты U_x методом Stereo PIV, которая после использования метода коррекции калибровки (рис. 8) не превышает 1 % от $U_{z_{\max}}$ для обоих рассматриваемых методов стереорекострукции скорости.

Дополнительно на полях компоненты средней скорости U_x и полях пульсаций осевой и поперечной скорости присутствуют кольца по типу дифракционных колец, которые образуются вследствие ошибки, называемой в иностранной литературе “peak-locking” [24] и связанной с дискретным представлением частиц в потоке на цифровых изображениях, а также с процессом субпиксельной интерполяции дискретного смещения частиц [1]. Указанные кольца можно заметить и на профилях скорости, показанных на рис. 9б и рис. 10а, б.

На рис. 10 приведены профили флуктуаций компонент скорости u_z и u_x , которые для ламинарного потока напрямую показывают случайную ошибку алгоритма. Видно, что в центральной части течения в трубе, где осевая скорость максимальна, случайная погрешность измерения минимальна и составляет около 1 % от $U_{z_{\max}}$. С удалением от центра трубы к ее стенке случайная погрешность измерений возрастает до 2 % ÷ 4 % в зависимости от метода реконструкции. Вблизи стенок метод стереорекострукции скорости по локальным градиентам имеет на 0,5 % меньшую случайную ошибку по сравнению с реконструкцией через репроекцию изображений стереопары. Увеличение случайной ошибки измерения скорости с приближением к стенке связано главным образом с увеличением градиента скорости измеряемого потока или величиной изменения смещения частиц внутри расчетной области на границе трубы $dx \approx 1,1$ пикс, со-

отнесенной с диаметром частиц на изображении $d_\tau \approx 2$ пикс [10]. Вторая причина связана с трудностью расчета скорости около стенки трубы, так как вне трубы нет частиц на изображении, а также присутствуют различные вредные оптические эффекты в виде отражения лазерного излучения от стенки трубы, прилипших или осевших крупных частиц на стенке и других загрязнений [10].

6. Заключение. В работе рассмотрены принципы измерений мгновенных полей скорости в потоках методом Stereo PIV. Обсуждены достоинства и недостатки трансляционной и угловой стереоскопических конфигураций эксперимента. На примере угловой конфигурации показано влияние таких параметров как толщина лазерного ножа и глубина резки изображаемого пространства на качество измерений и получаемое пространственное разрешение полей скорости.

В работе большое внимание уделено процедуре калибровки камеры как неотъемлемой части Stereo PIV измерений. Рассмотрены основные модели, применяющиеся для калибровки камеры в оптических методах измерения скорости, и способы вычисления параметров модели камеры. Результат анализа существующих реализаций процедуры калибровки камеры представлен в табл. 1. Описан эффективный алгоритм распознавания образов опорных точек на калибровочной мишени и привязки их к координатной сетке. Эффективность данного алгоритма подтверждена 3D-моделированием на искусственных изображениях калибровочной мишени и применением в реальных экспериментах.

Показаны возможные причины возникновения ошибки измерения скорости при проведении Stereo PIV эксперимента, в том числе описан численный алгоритм коррекции калибровки измерительной стереосистемы через вычисление поля диспаратности, который позволяет упростить процесс юстировки системы для проведения измерений скорости. Новизной описанного метода является учет вертикального диспаратета при коррекции калибровки камеры.

В работе рассматривались два известных метода стереорекострукции скорости: метод репроекции изображений и метод локальных градиентов модели камеры. Было проведено сравнение двух методов стереорекострукции скорости при тестировании на реальных экспериментальных данных. Тестирование проведено на данных эксперимента по измерению скорости в поперечном сечении трубы с ламинарным режимом течения [10], которые были получены авторами работы во время международного тест-симпозиума PIV Challenge 2005 [26]. В результате тестирования созданных авторами алгоритмов было показано, что для процедуры калибровки камеры наиболее оптимальной для изображений, содержащих нелинейные искажения, является полиномиальная модель с методом уточнения центра опорных точек через корреляцию с шаблоном маркера (КШ). Описанным методом коррекции калибровки камеры было определено рассогласование плоскости калибровочной мишени относительно плоскости лазерного ножа в 0,1 мм, которое приводило к погрешности измерения поперечной компоненты средней скорости до 1,5 %.

По результатам сравнения двух методов реконструкции можно сделать вывод, что оба метода по суммарной погрешности работают примерно одинаково, однако есть небольшая разница в величине случайной погрешности. Метод стереорекострукции скорости по локальным градиентам имеет погрешность на 0,5 % меньше в области с большим значением градиента скорости вблизи стенок трубы по сравнению с методом стереорекострукции скорости с репроекцией изображений. По мнению авторов, наибольшее различие между двумя методами стереорекострукции скорости заключается в удобстве и простоте использования. В этом случае метод стереорекострукции на основе расчета локальных градиентов модели камеры представляется более предпочтительным по количеству операций с данными, количеству промежуточных данных и скорости обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычислительные технологии. 2007. **12**, № 3. 109–131.
2. Hinsch K.D. Holographic particle image velocimetry // Meas. Sci. Technol. 2002. **13**. 61–72.
3. Maas H.G., Gruen A., Papantoniou D. Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows // Exp. Fluids. 1993. **15**. 133–146.
4. Elsinga G.E., Scarano F., Wieneke B., Oudheusden B.W. Tomographic particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2006. **41**. 933–947.
5. Arroyo M.P., Greated C.A. Stereoscopic particle image velocimetry // Meas. Sci. Technol. 1991. **2**. 1181–1186.
6. Prasad A.K. Stereoscopic particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2000. **29**. 103–116.
7. Prasad A.K., Jensen K. Shear flow stereocamera for particle image velocimetry in liquid flows // Appl. Opt. 1995. **34**. 7092–7099.
8. Soloff S.M., Adrian R.J., Liu Z.-C. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry // Meas. Sci. Technol. 1997. **8**. 1441–1454.
9. Willert C.E. Assessment of camera models for use in planar velocimetry calibration // Exp. Fluids. 2006. **41**. 135–143.

10. *Doorne C.W.H., Westerweel J.* Measurement of laminar, transitional and turbulent pipe flow using Stereoscopic-PIV // *Exp. Fluids* 2007. **42**. 259–279.
11. *Алексеевко С.В., Бильский А.В., Маркович Д.М.* Применение метода цифровой трассерной визуализации для анализа турбулентных потоков с периодической составляющей // *Приборы и техника эксперимента*. 2004. № 5. 145–153.
12. *Lawson N.J., Wu J.* Three-dimensional particle image velocimetry: error analysis of stereoscopic techniques // *Meas. Sci. Technol.* 1997. **8**. 894–900.
13. *Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А.* Цифровая обработка изображений в информационных системах. Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002.
14. *Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T.* Numerical recipes in C : the art of scientific computing. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
15. *Fournel T., Lavest J.-M., Coudert S., Collange F.* Self-calibration of PIV video-cameras in Scheimpflug // *Particle velocimetry: recent improvements*. Ed. by M. Stanislas, J. Westerweel, J. Kompenhans. Proceedings of the EURO-PIV2 Workshop. Zaragoza, Spain, March/April 2003. Berlin: Springer, 2003. 391–405.
16. *Giordano R., Astarita T.* Stereo PIV applied to non-uniform simulated displacement fields // *Proceedings of the 7th International Symposium on Particle Image Velocimetry*. Rome, Italy, September 11–14, 2007.
17. *Scarano F., David L., Bsibsi M., Calluaud D.* S-PIV comparative assessment: image dewarping+misalignment correction and pinhole+geometric back projection // *Exp. Fluids*. 2005. **39**. 257–266.
18. *Coudert S.J.M., Schon J.P.* Back-projection algorithm with misalignment corrections for 2D3C stereoscopic PIV // *Meas. Sci. Technol.* 2001. **12**. 1371–1381.
19. *Wieneke B.* Stereo-PIV using self-calibration on particle images // *Exp. Fluids*. 2005. **39**. 267–280.
20. *Meinhart C.D., Wereley S.T., Santiago J.G.* A PIV algorithm for estimating time-averaged velocity fields // *Journal of Fluids Engineering*. Transactions of the ASME. 2000. **122**. 285–289.
21. *Wieneke B.* Volume self-calibration for stereo-PIV and tomographic-PIV // *Proceedings of the 7th International Symposium on Particle Image Velocimetry*. Rome, Italy, September 11–14, 2007.
22. *Heikkilä J., Silvén O.* A four-step camera calibration procedure with implicit image correction // *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Toronto: IEEE Computer Society Press, 1997. 1106–1112.
23. *Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.* Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // *Вычислительные методы и программирование*. 2006. **7**. 79–85.
24. *Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J.* Particle image velocimetry. A practical guide. Berlin: Springer, 2007.
25. *Willert C.* Stereoscopic digital particle image velocimetry for application in wind tunnel flows // *Meas. Sci. Technol.* 1997. **8**. 1465–1479.
26. *Stanislas M., Okamoto K., Kähler C.J., Westerweel J.* Main results of the third international PIV challenge // *Exp. Fluids*. 2008. **45**. 27–71.

Поступила в редакцию
08.09.2008
