

## Корреляционная коррекция в методе слежения за частицами в потоках\*

Е.К. АХМЕТБЕКОВ, Д.М. МАРКОВИЧ, М.П. ТОКАРЕВ  
*Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*  
e-mail: yerbol@itp.nsc.ru, mtokarev@itp.nsc.ru

Исследован алгоритм построения полей скорости в методе слежения за частицами с применением коррекции, основанной на корреляционной обработке изображений частиц. На основе искусственно сгенерированных изображений частиц изучено влияние диаметра и концентрации частиц, а также величины их смещения на погрешность при расчете поля скорости. Алгоритм коррекции апробирован при обработке экспериментально полученных данных. Исследовано влияние алгоритма коррекции на пространственное разрешение метода PTV. Достоинством алгоритма является то, что с его использованием коррекция может осуществляться после применения как стандартного PTV, так и гибридных подходов PIV/PTV. В работе предложен метод отсева ошибочных векторов скорости в нерегулярном векторном поле, основанный на фильтре скользящего среднего.

*Ключевые слова:* PTV, PIV, корреляция, пространственное разрешение, импульсная струя.

### Введение

В современных методах цифровой трассерной визуализации применяются две основные группы подходов для обработки изображений частиц, полученных с короткой экспозицией в два момента времени: кросскорреляционный анализ с регулярным разбиением полного изображения на элементарные измерительные области (Particle Image Velocimetry, PIV) и методы слежения за каждой отдельно взятой частицей (Particle Tracking Velocimetry, PTV).

Корреляционный подход, реализуемый в методе PIV, представляет собой эффективный и удобный способ расчета вектора смещения. Высокая субпиксельная точность определения максимума корреляционной функции и соответственно смещения частиц, а также наличие надежных способов выделения полезного сигнала (высокое отношение сигнал/шум) являются важными достоинствами метода PIV [1]. Однако применение данного метода накладывает определенные ограничения на условия проведения эксперимента, к чему относится, например, необходимость обеспечения некоторого минимального количества трассерных частиц в элементарной измерительной области. Это требование приводит к невозможности радикального повышения пространственного разрешения метода даже с использованием частичного перекрытия элементарных расчетных областей (наиболее часто применяемое перекрытие составляет 50 % и позволяет

---

\*Работа проводилась в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы.

увеличить количество векторов скорости в 4 раза, однако не приводит к повышению точности при определении ряда значимых характеристик турбулентных потоков). Для достижения бóльшего пространственного разрешения в методе PIV необходимо уменьшать размеры исследуемой области, что не позволяет измерять мгновенные поля скорости в потоке в целом.

Еще одно ограничение традиционного PIV — это невозможность эффективно обрабатывать изображения с существенно неравномерным распределением частиц. Значительные усилия в этом направлении были предприняты авторами работы [2], где предложено использовать информацию об отдельных частицах для выбора положения точек измерения скорости и оптимального значения размера окна в зависимости от локальной концентрации частиц.

Одним из преимуществ метода PTV является большое пространственное разрешение полей скорости, при этом локальность полученного вектора скорости имеет максимально возможное значение. Кроме того, нет необходимости в дополнительных мерах при обработке изображений с неравномерным распределением частиц. Метод PTV включает следующие стадии: определение положения центров частиц, нахождение пар частиц и расчет векторов смещения, отсеивание ошибочных векторов. Основные проблемы при применении метода PTV связаны с распознаванием неярких и перекрытых образов частиц, а также с недостаточной точностью определения положений центров частиц. Первая проблема ведет к уменьшению количества рассчитанных векторов скорости и соответственно к ухудшению пространственного разрешения. Высокая точность определения положения центра частицы и, в конечном счете, смещения частицы является необходимым условием для расчета и дальнейшего анализа статистических моментов скорости высших порядков в турбулентных потоках.

Изложенный в работе [3] метод корреляции с гауссовой маской PMC (Particle Mask Correlation) в сравнении с применяемым обычно методом простой бинаризации по порогу интенсивности позволяет значительно улучшить способность метода PTV к идентификации затененных частиц и частиц с перекрытыми образами.

В двухкадровой реализации метода PTV, после определения положения центров частиц на первом и втором кадрах для последующего расчета вектора смещения необходимо каждой частице на первом кадре найти пару во втором кадре, т. е. образ той же самой частицы, переместившейся за заданный промежуток времени в другую точку пространства. Простейшая реализация метода поиска пар заключается в нахождении ближайшей частицы на втором кадре, которой присваивается метка пары текущей частицы на первом кадре. Этот стандартный двухкадровый метод PTV [4] имеет следующее ограничение: смещение частицы на двух последовательных кадрах не должно превышать половины среднего расстояния между частицами на одном кадре изображения. Фактически это является ограничением на пространственное разрешение или на динамический диапазон измеряемых скоростей в потоке, поскольку на плотность изображений частиц в кадре накладывается ограничение сверху, связанное с максимальным смещением частицы. Для другой модификации метода PTV [5, 6] необходимо использование четырех кадров изображений частиц, полученных с одинаковыми временными интервалами между ними. Треки по четырем изображениям идентифицируются в соответствии с критерием расходимости. Трек с минимальной расходимостью считается верным для текущей частицы. Метод легко реализуем, но не применим при существенных значениях третьей, перпендикулярной лазерному ножу, компоненты скорости. Основная идея еще одной модификации метода PTV (Enhanced PTV—EPTV [7])

заключается в использовании информации о размерах трассеров для поиска пар частиц. Преимуществом метода является то, что он теоретически может быть применим к потокам любого типа, в том числе с достаточно большими градиентами скорости. К его недостаткам относится сложность выполнения некоторых условий эксперимента, а именно, обеспечения однородности интенсивности излучения по толщине лазерного ножа. Кроме того, достаточно широкое распространение получили комбинированные PIV/PTV-подходы. Метод Super Resolution PIV (SR PIV) [8–12] основывается на корреляционной обработке изображений частиц на первом этапе и уточнении вектора смещения каждой отдельной частицы на втором этапе.

В данной работе описан комбинированный подход, в котором применены корреляционные методы и методы слежения за частицей. Это позволяет избежать большинства недостатков каждого из методов, сохраняя их достоинства — высокое пространственное разрешение и точность. Основная идея подхода заключается в использовании коррекции, основанной на корреляции изображений индивидуальной частицы в обоих кадрах после нахождения пары и построения вектора скорости. Такой метод коррекции называется Individual Particle Correlation (IPC) [13]. Применение этого метода позволяет уменьшить размер корреляционного окна до размеров изображения отдельной частицы. Стандартный PIV-метод не позволяет успешно определять смещения частиц по расчетным областям малого размера, так как нельзя гарантировать наличие и достаточную концентрацию частиц в данной области. Предварительно рассчитанное нерегулярное поле PTV дает возможность использовать изображения отдельных найденных частиц. Подход IPC позволяет увеличить точность расчета смещения частиц в стандартном PTV-методе.

## 1. Описание алгоритма

Процесс обработки изображений частиц методом PTV с коррекцией состоит из четырех стадий: 1 — определение положения центров частиц, 2 — нахождение пар частиц, 3 — корреляционная коррекция смещения частиц, 4 — отсев ошибочных векторов. Положения центров частиц определяются при помощи корреляционного поиска Particle Mask Correlation. Метод PMC позволяет распознать частицу, основываясь на форме ее образа (форме распределения интенсивности), которая может быть аппроксимирована двумерным распределением Гаусса, при этом абсолютное значение максимума интенсивности не имеет значения. Нормализованный коэффициент корреляции области изображения вблизи текущего пикселя с предварительно построенной гауссовой маской рассчитывается для каждого пикселя. Таким образом, получается поле корреляций, для которого проводится пороговая бинаризация. В полученных доменах ведется поиск максимума, центр его и соответствует положению частицы. Частицы с частично перекрытыми образами на изображении различаются автоматически.

### 1.1. Нахождение пар частиц

В данной работе для поиска пар частиц использовался релаксационный метод. Этот метод, описанный в [13], основан на оценке вероятности каждой из возможных пар. Для каждой частицы на первом кадре ведется поиск пары на втором кадре в пределах окружности с радиусом, равным максимально возможному перемещению  $T_m$ . Каждой из возможных пар на втором кадре присваивается одна и та же начальная вероятность, кроме того рассматривается отдельная вероятность для состояния поте-

ри пары, которая также равна начальной вероятности остальных вариантов. Сумма вероятностей всех исходов равна единице. Вероятность каждого исхода итерационно пересчитывается. При оценке вероятности текущей пары рассматриваемой частицы у соседних частиц ведется поиск пар, совершающих близкое по величине смещение, и в случае нахождения их вероятности дают вклад в вероятность текущей пары. Этот метод позволяет определять пары частиц без дополнительных предварительных расчетов и может быть применен для обработки потоков с высокой концентрацией частиц (вплоть до 0.05 частиц/пикс<sup>2</sup>). Однако описанный метод требует значительных вычислительных ресурсов. Предварительно обработанные методом PIV данные могут в существенной мере уменьшить количество частиц — кандидатов в пары и увеличить производительность. Ниже предлагаемый подход будет называться гибридным релаксационным. Оригинальный метод имеет три параметра. Поиск кандидатов в пары для каждой частицы в первом кадре ведется среди частиц во втором кадре в пределах окружности с радиусом  $T_m$  и с центром, совпадающим с положением частицы в первом кадре. Второй параметр  $T_n$  определяет радиус окрестности текущей частицы, в которой соседние частицы показывают схожее движение с небольшими отклонениями. Величина такого отклонения является третьим параметром  $T_q$ .

Предварительно рассчитанные методом PIV поля скорости на регулярной сетке могут быть использованы несколькими способами. Одним из таких способов является поиск ближайшей частицы к положению, предсказанному вектором смещения, который, в свою очередь, получен методом PIV. Этот метод называется SR PIV (Super-Resolution PIV). Такой подход является расширением метода PIV и обладает теми же недостатками, что и PIV, — сложностью в обработке при наличии больших градиентов скорости и невозможностью разрешения мелкомасштабных структур. В нашей работе использовался релаксационный алгоритм слежения за частицей. Основной задачей было уменьшить число кандидатов, отбросив очевидно неверные пары. Таким образом, гибридный метод имеет три дополнительных параметра, которые используются вместо параметра  $T_m$ . Новые параметры необходимы для определения области поиска пары на втором изображении. Основной параметр — это отношение радиуса области поиска к длине предсказанного вектора, который был интерполирован в местоположение центра текущей частицы из PIV-данных. Оставшиеся два параметра — это минимальное и максимальное абсолютное значение этого радиуса.

## 1.2. Коррекция методом корреляции изображения частицы

Важными характеристиками любого метода определения положения частиц являются коэффициент распознавания частиц и субпиксельная точность определения их положения. Метод корреляции с гауссовой маской обладает хорошей способностью к распознаванию частиц.

Для достижения высокой субпиксельной точности при определении положения центров частиц, в том числе и методом РМС, чаще всего используется трехточечная и двумерная гауссова интерполяция. Однако результаты тестирования на искусственных изображениях показали, что точность определения положения частиц, полученного таким образом, недостаточна и данные методы не позволяют избежать ошибки, связанной с эффектом группировки рассчитываемых величин (положения центра частицы и вектора смещения) у целых значений пикселей (peak-locking). Это обусловлено систематической ошибкой, связанной с дискретизацией изображения.

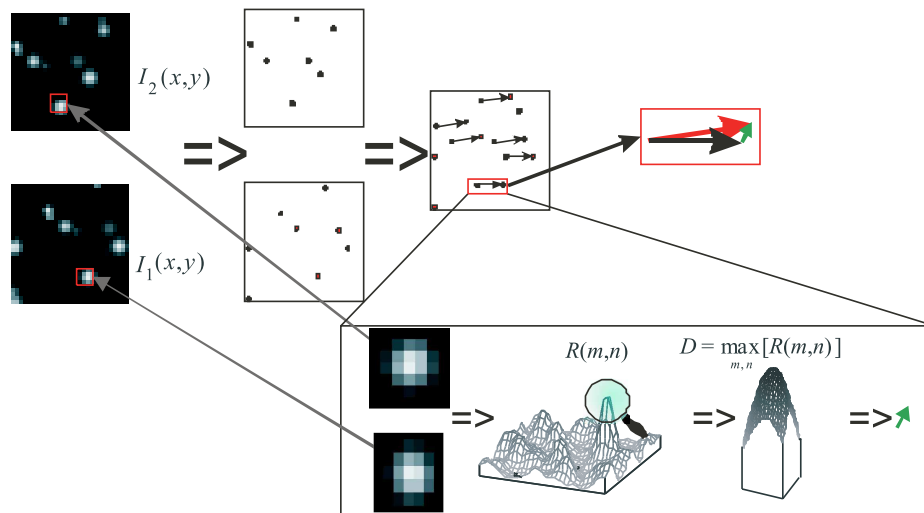


Рис. 1. Схема работы метода коррекции

Для уменьшения эффекта *reak-locking* в данной работе используется алгоритм коррекции векторов смещения методом ИРС. Коррекция применяется после нахождения вектора смещения и до процедуры отсева ошибочных векторов. Цель алгоритма коррекции — увеличение точности результирующего вектора смещения. Таким образом, совместное применение метода корреляции с гауссовой маской и алгоритма коррекции позволяет достичь высокой субпиксельной точности и значительной величины коэффициента восстановления.

Для применения коррекции по изолированным изображениям одной и той же частицы на обоих кадрах рассчитывается поле кросскорреляции (рис. 1). Положение максимума на корреляционной плоскости определяет значение вектора коррекции.

Перед применением корреляционной коррекции малые области на изображениях первого и второго кадров восстанавливаются путем интерполяции в новых системах координат. Началом координат в них являются дробные положения центров частиц на исходном изображении. Интерполяция проводится для того, чтобы сместить положение корреляционного максимума в последующей процедуре корреляционной коррекции ближе к началу координат, где субпиксельная оценка положения максимума имеет меньшую ошибку. Иными словами, чем меньше значение вектора коррекции, тем меньше величина систематической ошибки. Для интерполяции изображений использовалась двумерная кубическая В-сплайн схема, которая по данным тестирования [1] имеет наилучшее соотношение точность/время расчета применительно к изображениям частиц. Коррекцию ИРС можно применять итерационно несколько раз, в каждом случае используя уточненное на предыдущем шаге значение вектора смещения.

Для определения положения максимума на корреляционной плоскости с субпиксельной точностью применяется трехточечная гауссова интерполяция, имеющая такие же ограничения субпиксельной точности, как и при определении субпиксельного положения центра частицы, однако подобная процедура проводится один раз для каждого вектора смещения, тогда как без применения коррекции она проводится дважды. Кроме того, с каждой итерацией величина ошибки должна уменьшаться (в пределе стремиться к нулю), поскольку если значение вектора коррекции близко к целому (в нашем случае — к нулю), то ошибки методов интерполяции значительно снижаются.

### 1.3. Отсев ошибочных векторов

Автоматическая обработка изображений неизбежно приводит к появлению ошибочных векторов смещения. Такие векторы могут появиться из-за низкого качества изображения частиц, наличия больших градиентов скорости, существенных значений компоненты скорости, перпендикулярной плоскости лазерного ножа, и других эффектов. Поиск и удаление таких векторов до последующей обработки является важным шагом, поскольку их влияние на итоговые данные существенно, особенно на старшие статистические моменты в турбулентных течениях [15], и связанные с этим погрешности полностью устранить весьма сложно [15, 16]

#### 1.3.1. Алгоритм скользящего среднего для поля скорости на регулярной сетке

Этот метод основан на предположении о локальной гладкости векторного поля. Значение каждого вектора сравнивается со значением соседних векторов. Вектор  $\mathbf{v}(x, y)$  рассматривается как ошибочный, если выполняется соотношение  $|\mathbf{v}(x, y) - \bar{\mathbf{v}}(x, y)| < k$ , где  $\bar{\mathbf{v}}(x, y)$  — средняя локальная скорость. Пороговое значение  $k$  рассчитывается следующим образом:  $k = \alpha \max_{x,y} |\mathbf{v}(x, y) - \bar{\mathbf{v}}(x, y)|$ , где  $0 < \alpha < 1$  [17].

#### 1.3.2. Алгоритм скользящего среднего для поля скорости на нерегулярной сетке

Сложность применения алгоритма скользящего среднего к нерегулярным данным состоит в том, что в этом случае невозможно подобрать оптимальный размер области осреднения, которая, безусловно, будет содержать соседние векторы. Если рассматривать достаточно большую область, заведомо включающую соседние векторы, метод будет работать неточно, так как среднее значение скорости может сильно отличаться от локального значения. Для решения этой проблемы было предложено рассматривать большую область с учетом весовой функции по Гауссу. Таким образом, оригинальные выражения были преобразованы к следующему виду:

$$|\mathbf{v}(\mathbf{r}_0) - \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}_0)| < k, \quad \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}_0) = \frac{\sum_{n \in N(\mathbf{r}_0)} \mathbf{v}_n w_n(\mathbf{r}_0)}{\sum_{n \in N(\mathbf{r}_0)} w_n(\mathbf{r}_0)},$$

$$w_n(\mathbf{r}_0) = \exp\left(-\frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_n}{2\sigma^2}\right), \quad k = \alpha \max_{n \in N(\mathbf{r}_0)} |\mathbf{v}_n - \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{r}_0)|,$$

где  $N(\mathbf{r}_0)$  — множество векторов из области осреднения. Описанный метод может быть применен несколько раз итерационно. Каждая итерация удаляет векторы, наиболее отличные от среднего вектора, рассчитанного с весовой функцией.

Использование двух дополнительных параметров позволяет избежать другой проблемы, которая проявляется, когда поле скорости уже не содержит ошибочных векторов. Особенность этого метода в том, что он находит ошибочные векторы всегда, помечая наиболее отличимый от среднего вектор скорости как неверный. Дополнительные параметры ограничивают нижнюю границу отличия, достаточного для определения вектора как неверного. Первый параметр — абсолютная нижняя граница, второй — нижняя граница, рассчитываемая относительно средней длины вектора.

## 2. Тестирование алгоритма на синтетических изображениях

Для тестирования алгоритма PTV с коррекцией IPC были созданы синтетические изображения. Сравнивались результаты обработки методами PTV, стандартным FFT-CC PIV и итерационным PIV (CWS B-Spline PIV) (рис. 2, *a*). При этом учитывались данные [16, 18].

Отдельные тесты использовались для оценки различных свойств алгоритма коррекции: определение центра частицы, нахождение пар частиц, систематическая и случайная ошибки. Размер синтетических изображений —  $1024 \times 1024$  пикс, глубина оттенков серого составляла 16 бит. Тепловой шум цифровой матрицы не моделировался. Компонента скорости, перпендикулярная плоскости изображения, была равна нулю. Во всех тестах, кроме теста на нахождение пар частиц (рис. 2, *b*), количество частиц на изображении составляло 20000 ( $0.019$  частиц/пикс<sup>2</sup>).

Тестирование способности алгоритма к определению центров частиц проводилось на искусственных изображениях с частицами гауссовой формы и диаметрами в диапазоне от 1 до 7 пикс с шагом 0.1 пикс. Диаметр  $d_p$  образа частицы на изображении определялся шириной гауссова распределения по уровню интенсивности  $I = I_0 \exp^{-2}$ , где  $I_0$  — интенсивность в центре распределения, согласно [16]. Равномерное смещение частиц составляло  $d = 0.5$  пикс, так как при этом значении алгоритм имеет максимальную погрешность.

На рис. 2, *a* представлена зависимость случайной ошибки определения смещения от диаметра частиц  $d_p$ . Результаты, полученные по стандартным PIV- и PTV-алгоритмам, имеют минимумы при  $d_p = 2.5$  и 1.9 пикс соответственно, что хорошо согласуется с данными [16, 18, 19]. Кривая PTV имеет второй минимум. Согласно [18], с увеличением  $d_p$  наблюдаются и другие минимумы. Применение алгоритма коррекции позволяет увеличить диапазон диаметров частиц, при котором уровень шума остается относительно низким.

График, соответствующий PTV с коррекцией, повторяет форму графика для адаптивного PIV-алгоритма. В диапазоне 1–1.5 пикс оба PTV-метода показывают неустойчивое поведение, что может быть связано с частотной фильтрацией в ходе определения

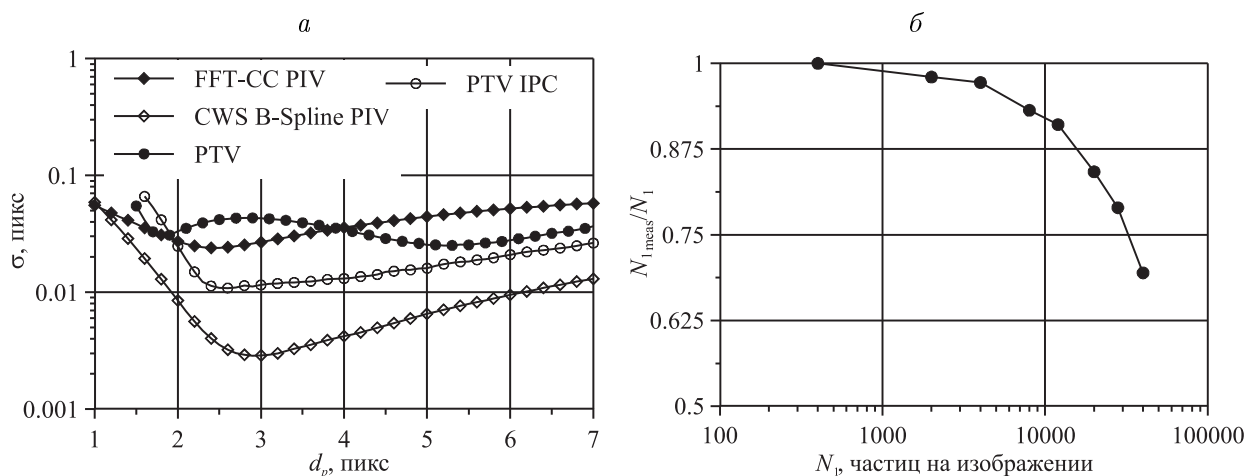


Рис. 2. Случайная ошибка в зависимости от диаметра образа частицы (*a*) и количество верно определенных векторов для различных концентраций частиц на синтетическом изображении (*b*)

положения частиц методом РМС. В ходе тестирования способности метода к нахождению пар рассчитывалось количество полученных пар  $N_{I\text{meas}}$  для различных концентраций частиц  $N_I$  (см. рис. 2, б). Однородное смещение частиц в исследуемых изображениях составляло  $d = 0.5$  пикс. При малых концентрациях число найденных пар совпадает с числом сгенерированных частиц. Начиная с 4000 частиц на изображении (концентрация  $0.0076$  частиц/пикс<sup>2</sup>) появляются неопределенные пары. При концентрации в 40000 ( $0.038$  частиц/пикс<sup>2</sup>) определяется 70 % частиц. Таким образом, с увеличением концентрации частиц эффективность нахождения пар снижается.

Оценка точности алгоритмов проводилась при помощи синтетических изображений с равномерным горизонтальным смещением в пределах от 0 до 2 пикс и шагом 0.05 пикс. На рис. 3 представлены средние значения систематической и случайной ошибок для РТВ- и РIV-методов. Графики ошибок имеют периодическую форму, зависящую от величины смещения частиц [20]. Ошибка уменьшается для РТВ с коррекцией, при этом оставаясь выше уровня адаптивного РIV. Это может быть объяснено небольшим размером корреляционного окна, используемого в РТВ с коррекцией, по сравнению с размером окна в случае РIV. Кроме того, на рис. 3 приведены зависимости для РТВ с коррекцией с размером корреляционных окон 3 и 5 пикс.

Следующий тест был проведен для подтверждения того, что пространственное разрешение метода РТВ после применения корреляционной коррекции не ухудшается. Искусственные изображения были сгенерированы с одномерным синусоидальным смещением и различными волновыми числами для вертикальной компоненты скорости вдоль оси  $x$ :  $v = 3 \sin(2\pi\omega x/5)$ , где  $\omega = F/\lambda = 5/\lambda = 0.005 \div 1$  (шаг 0.05) — безразмерное волновое число, нормированное на размер области  $F$ . Оптимальный размер окна для алгоритма коррекции  $F = 5$  пикс. Передаточная функция  $T(\omega) = v(\omega)/v_0(\omega)$  была рассчитана во всех точках поля скорости для текущего волнового числа  $\omega$  [21]:

$$\delta(\omega)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_{0i} - T(\omega)v_{0i})^2; \quad T(\omega) = 1 - \sqrt{\delta(\omega)^2 / \sum_{i=1}^N v_{0i}^2}, \quad T(\omega) < 1.$$

На рис. 4, а представлены несколько передаточных функций для текущего теста: прямоугольный фильтр скользящего среднего (top-hat moving average filter — ТНМА),

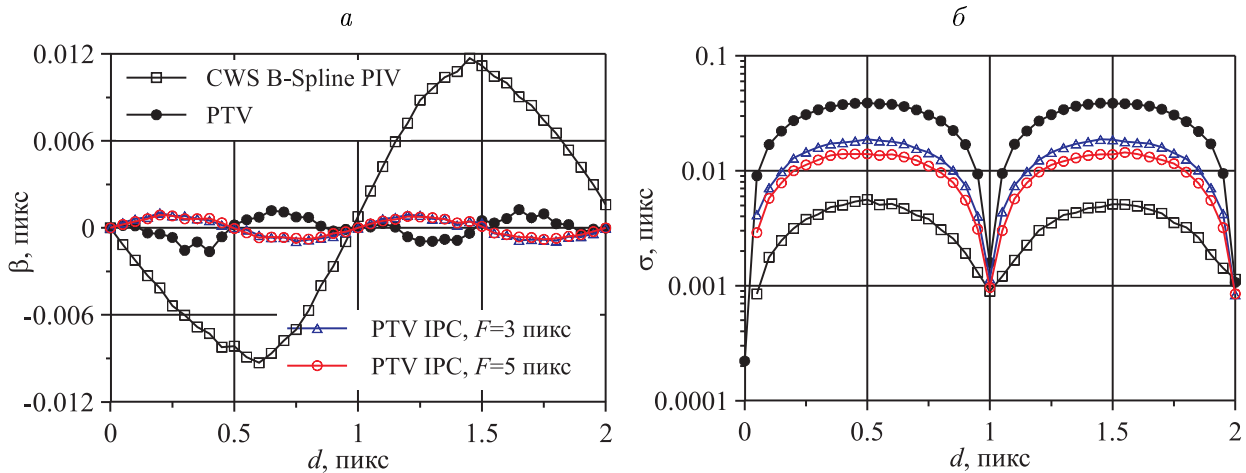


Рис. 3. Средние значения систематической (а) и случайной (б) ошибок как функции от смещения частиц



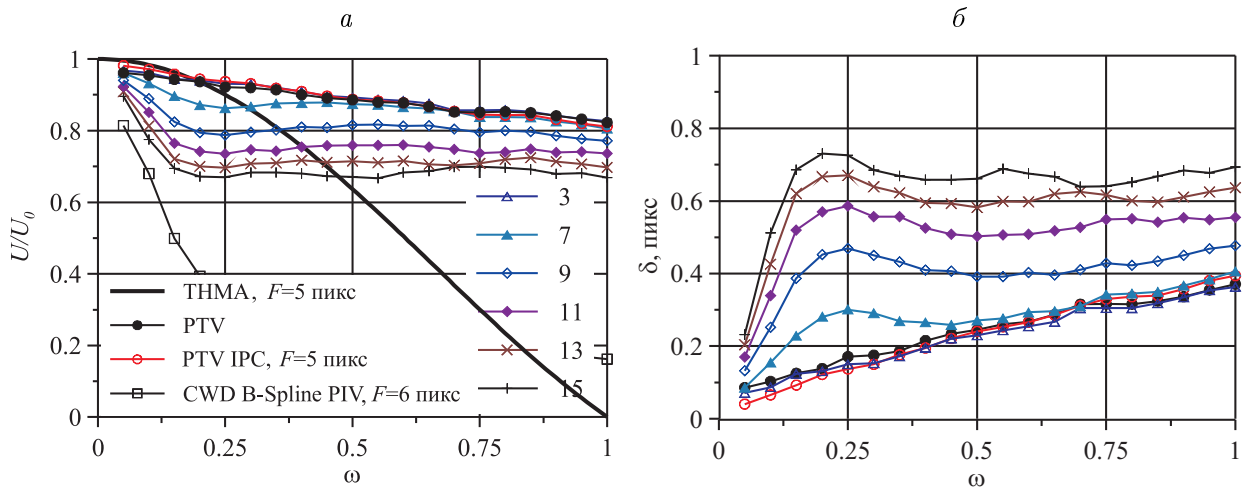


Рис. 4. Пространственное разрешение по сравнению с прямоугольным фильтром скользящего среднего (ТНМА) (а) и полная ошибка (б) методов PIV и PTV для одномерного синусоидального смещения в зависимости от наложенной пространственной частоты

и графики для стандартного PTV и PTV с коррекцией при размере окна 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 пикс. Результаты ТНМА приведены для сравнения, так как они схожи с данными кросскорреляционного анализа PIV. Передаточные функции для PTV и PTV с окном коррекции в 3 и 5 пикс различается незначительно. Кривые с другими размерами окон показывают меньшее пространственное разрешение, так как имеют меньшую частотную границу отсечения. Из рис. 3, б следует, что среднеквадратичное значение ошибки для окна размером в 5 пикс ниже по сравнению с окном в 3 пикс. Таким образом, оптимальное значение размера корреляционного окна было выбрано равным 5 пикс. Для  $\omega < 0.5$  на рис. 4, а PTV с коррекцией показывает несколько лучшие результаты по сравнению со стандартным PTV. Рисунок 4, б подтверждает этот вывод. Таким образом, алгоритм корреляционной коррекции с небольшим размером корреляционного окна практически не уменьшает локальность метода PTV в изображениях со стандартной для PIV концентрацией частиц.

### 3. Эксперимент по исследованию турбулентной осесимметричной импактной струи

#### 3.1. Параметры проведения эксперимента

В ходе эксперимента определялись характеристики затопленной осесимметричной импактной струи. Полученные изображения частиц использовались для тестирования метода IPC. Течение было организовано в прямоугольной емкости из органического стекла высотой 40 см, шириной 20 см и длиной 20 см (рис. 5, а). Во время эксперимента температура воды поддерживалась постоянной  $32 \pm 0.5$  °C. Режим турбулентного струйного течения характеризовался числом  $Re = 19\,000$ , которое определялось по средней расходной скорости течения  $U_0 = 1.028$  м/с и диаметру профилированного сопла  $d_{\text{nozzle}} = 15$  мм. Измерения проводились с помощью системы ПОЛИС под управлением программного обеспечения ActualFlow [22]. Расстояние между соплом и импактной поверхностью составляло три диаметра сопла. Двойной импульсный Nd:YAG-лазер NewWave Solo III с энергией в импульсе, равной 50 мДж, использовался для освещения

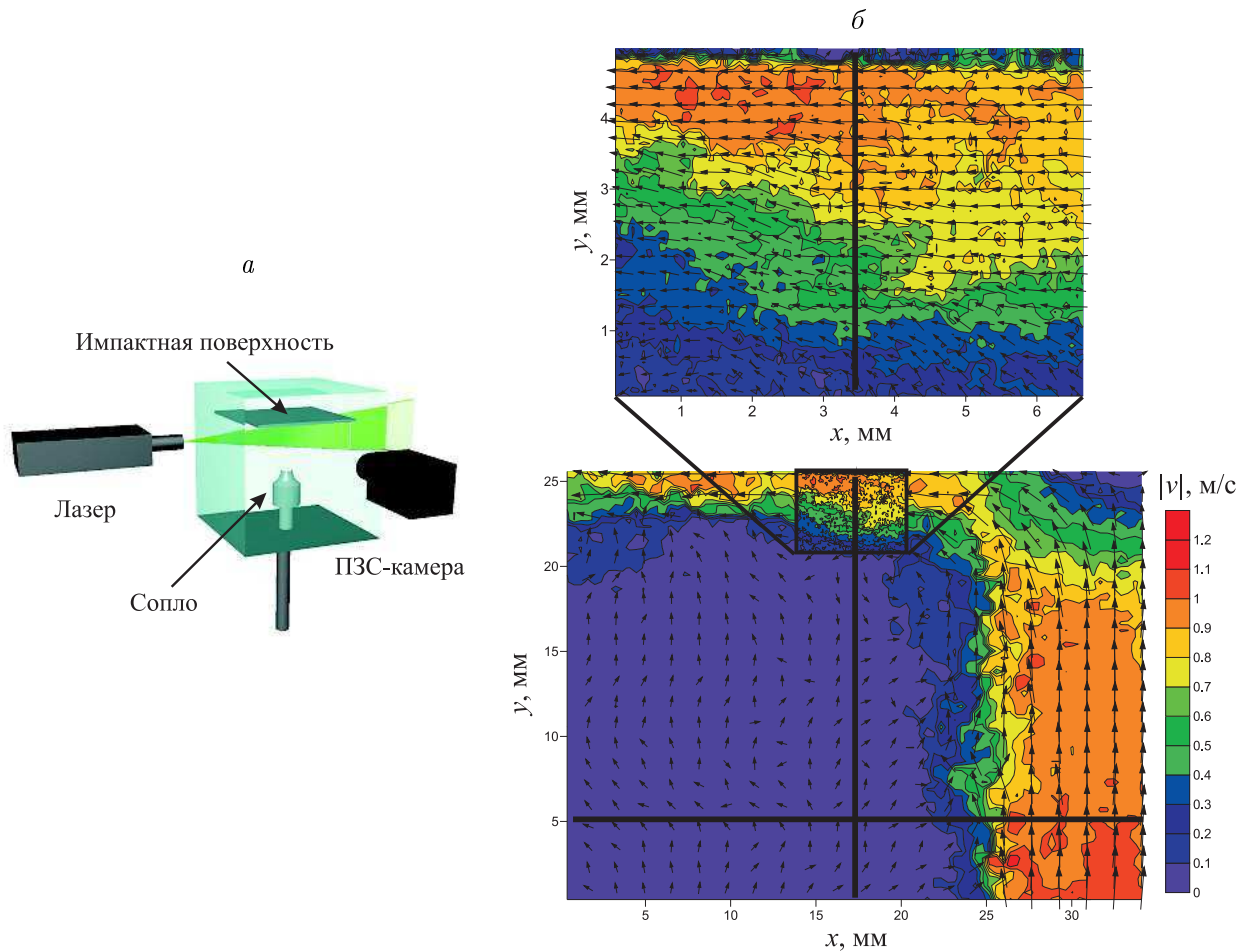


Рис. 5. Схема эксперимента (а) и типичное мгновенное поле скорости для экспериментов № 1 и 2 с размером исследуемой области соответственно  $35 \times 25$  мм и  $6.5 \times 5$  мм (б); жирные линии — горизонтальное и вертикальное сечения, вдоль которых проводилось наблюдение

потока. Лазерный нож формировался при помощи цилиндрической линзы. Толщина лазерного ножа в области исследования составляла 0.8 мм. Для регистрации изображений частиц применялась цифровая ПЗС-камера Видеоскан 205Д с разрешением  $1360 \times 1024$  пикс. Для регулировки положения камеры использовалось прецизионное координатное устройство. Были проведены два эксперимента с разным размером исследуемой области: № 1 —  $35 \times 25$  мм и № 2 —  $6.5 \times 5$  мм с высоким пространственным разрешением. В экспериментах использовались полиамидные частицы размером 20 и 5 мкм соответственно. Плотность частиц равнялась  $1.05 \text{ кг/м}^3$ . В обоих случаях верхняя граница области измерения совпадала с импактной поверхностью. Для получения достоверной статистической информации в каждом эксперименте зарегистрировано и обработано 3000 пар изображений.

### 3.2. Параметры обработки данных

Экспериментальные данные были обработаны гибридным релаксационным методом PTV как с коррекцией, так и без коррекции ИРС. Результаты PTV-метода сравнивались с результатами итерационного PIV-алгоритма с переразбиением сетки между итерациями. Перед поиском смещения частиц проводилась предварительная обработка изобра-

жений. Импактная поверхность в верхней части изображения маскировалась черным цветом. Далее осредненное по ансамблю изображение частиц вычиталось из каждого исходного изображения. Ниже представлены параметры, использованные в первом эксперименте с большим размером измерительной области. Число частиц на изображении составляло около 20000, что соответствовало плотности  $N_I = 0.02$  частиц/пикс<sup>2</sup>.

Гибридная схема релаксационного метода была применена со следующими параметрами:  $T_n = 15$  пикс,  $T_q = 3$  пикс, три итерации. Радиус предсказанной области находился в интервале  $[5; 8]$  пикс и определялся относительным коэффициентом  $R = 0.5$  (т.е. радиус области поиска равнялся половине длины предсказанного вектора). Алгоритм коррекции применялся с использованием корреляционного окна размером 5 пикс с четырьмя итерациями. Последующий отсев ошибочных векторов проводился при следующих значениях параметров: радиус осреднения  $R_{\text{avg}} = 20$  пикс, ширина гауссовой весовой функции  $\sigma_{\text{weight}} = 10$  пикс,  $\alpha = 0.99$ , две итерации, абсолютная и относительная нижние границы отсева равны соответственно 1 пикс и 10%. Статистические характеристики рассчитывались на базе оригинальных PTV-данных без использования промежуточной интерполяции на регулярную сетку.

Конечный размер корреляционного окна для алгоритма PIV был выбран  $F = 16$  пикс, расстояние между узлами сетки равнялось 8 пикс (50%-е перекрытие областей). Начальный размер элементарной области  $F = 32$  пикс. Две итерации адаптивного PIV-алгоритма с непрерывным смещением и деформацией областей проводились с начальным размером элементарной области. После переразбиения сетки выполнялись еще две итерации с конечным размером областей. Между итерациями проводился отсев ошибочных векторов в соответствии с процедурой, описанной в [23]. Все идентифицированные ошибочные векторы заменялись на интерполированные. После заключительной итерации замена векторов не проводилась. При расчете кросскорреляции для увеличения эффективного пространственного разрешения элементарные области изображения рассматривались с учетом весовой функции — двумерного распределения Гаусса с полушириной  $0.5F$ . Для деформации расчетных областей использовалась интерполяционная схема — двумерный кубический B-сплайн.

Второй эксперимент с зуммированием исследуемой области и с числом частиц на изображении, равным 7500 (плотность частиц  $N_I = 0.007$  частиц/пикс<sup>2</sup>), был обработан со следующими параметрами. Для гибридной релаксационной схемы PTV минимальный и максимальный радиусы предсказанной области равнялись соответственно 2 и 8 пикс. Поиск ошибочных векторов проводился с параметрами: ширина гауссовой весовой функции  $\sigma_{\text{weight}} = 15$  пикс,  $\alpha = 0.99$ , одна итерация, абсолютная нижняя граница отсева равна 0 пикс, относительная граница составляла 20%. Остальные параметры аналогичны используемым в первом эксперименте за исключением того, что размеры окон были в два раза больше, т.е.  $F = 64$  и  $F = 32$  пикс для начального и конечного размера расчетной области соответственно.

### 3.3. Результаты эксперимента

На рисунке 5, б приведены примеры мгновенных распределений скорости для обоих экспериментов. Профили компонент средней скорости и компонент кинетической энергии турбулентности (КЭТ), приведенные на рис. 6–8, построены вдоль сечений, показанных жирными линиями на рис. 5, б.

На рис. 6, *a* представлена средняя скорость в горизонтальном сечении ( $y = 5$  мм). Ось симметрии струи совпадает с осью абсцисс. Максимальное значение скорости на выходе сопла равнялось  $V_y = 1.028$  м/с. Распределения средней продольной скорости, полученные тремя методами (PIV, PTV, PTV с коррекцией), с хорошей точностью совпадают друг с другом. Исключением является область в диапазоне  $r/D$  от 0.2 до 0.45 в слое смешения, где средняя скорость, полученная методом PIV, меньше скорости, рассчитанной методом PTV, примерно на 4%. Это, очевидно, связано с влиянием пространственного осреднения в методе PIV, которое в областях с большими градиентами скорости может давать дополнительную ошибку.

На рис. 6, *б* приведены распределения средней компоненты скорости  $V_x$  в вертикальном сечении с большей детализацией вблизи импактной поверхности (эксперимент № 2). Статистика для PTV-данных была рассчитана на сетке с элементарной ячейкой размером в 16 пикс без перекрытия. Шаг сетки для PIV равен 16 пикс ( $F = 32$  пикс с 50%-м перекрытием). Разница между кривыми PIV и PTV на рис. 6, *б* для  $y' = 0.2$  мм составляла 3%, что, как и в эксперименте № 1, может быть связано с недооценкой значений скорости, полученных методом PIV, за счет высоких градиентов скорости в данной области.

Распределения компонент кинетической энергии турбулентности  $v_x'^2$  и  $v_y'^2$  в горизонтальном сечении струи ( $y = 5$  мм) приведены на рис. 7, *a*, *б* соответственно. Основные различия между этими величинами, рассчитанными различными методами, наблюдаются в центре сдвигового слоя, где уровень турбулентных пульсаций достигает максимума. Видно, что значения КЭТ, полученные с помощью метода PTV, находятся выше данных, полученных методом PIV. Причиной такого различия может быть как ошибка используемого алгоритма PTV/PIV, так и эффект пространственного разрешения, который определяется общим размером измерительной области, размером элементарной расчетной ячейки для PIV или характерным расстоянием между частицами на изображении для PTV [24].

Погрешности алгоритма в первую очередь влияют на измеренный уровень турбулентности в эксперименте № 2 с большим пространственным разрешением (уменьшен-

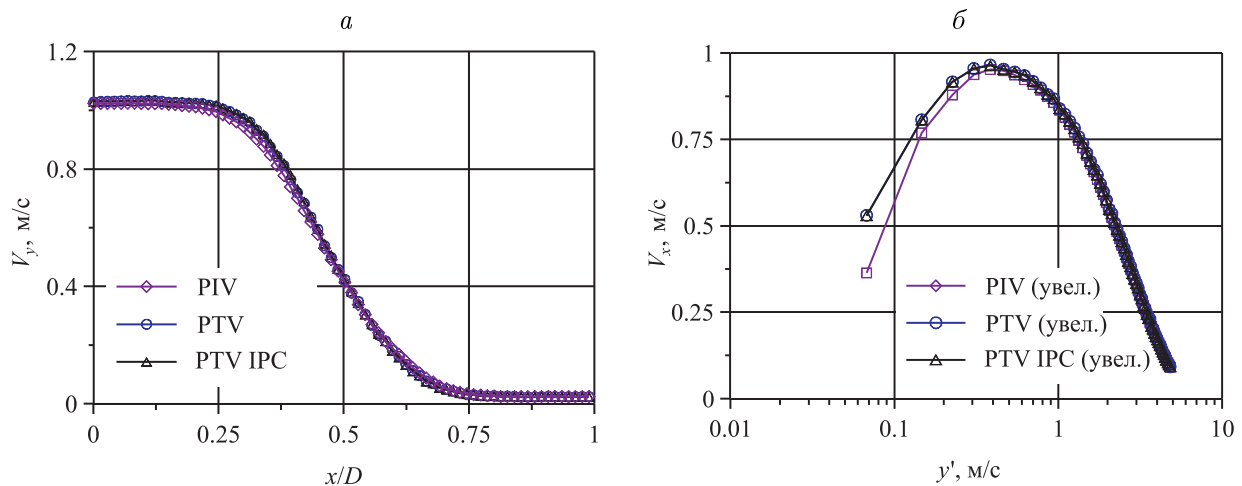


Рис. 6. Средняя скорость в горизонтальном сечении ( $y = 5$  мм) для осевой компоненты скорости, рассчитанная различными методами, эксперимент № 1 (*a*) и средняя скорость в вертикальном сечении ( $x = 3.4$  мм) для компоненты скорости вдоль импактной поверхности, эксперимент № 2 с большим пространственным разрешением (*б*)

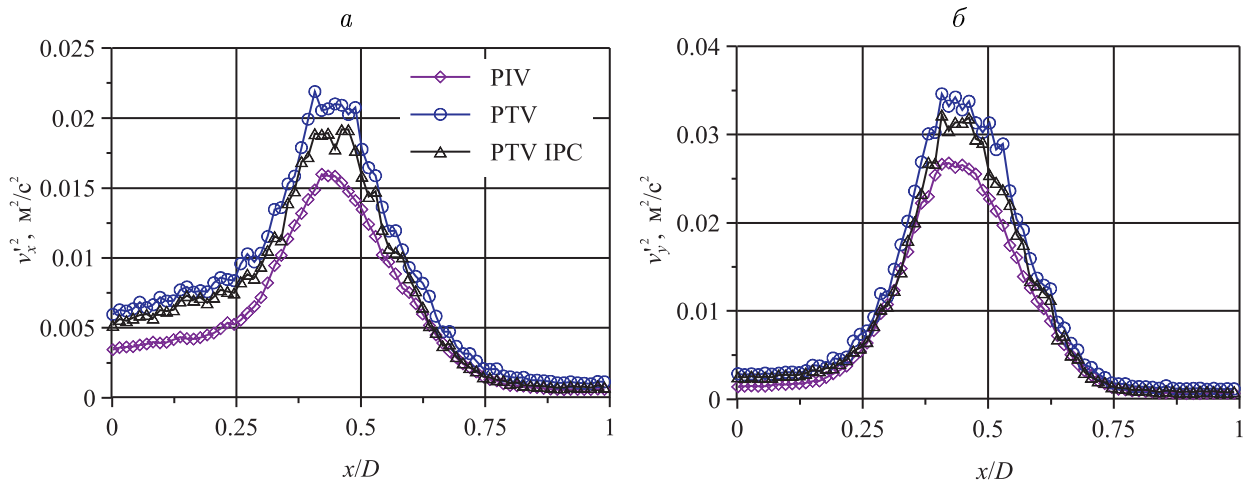


Рис. 7. Радиальная (а) и осевая (б) компоненты КЭТ в горизонтальном сечении ( $y = 5$  мм), рассчитанные различными методами; эксперимент № 1

ная область измерения). Для эксперимента № 1 с меньшим пространственным разрешением (большая область измерения) ошибка алгоритма и эффекты пространственного разрешения оказывают примерно равнозначное влияние на измеренные значения пульсационных характеристик. Измеренные значения турбулентных характеристик (статистические моменты высших порядков, диссипация КЭТ и др.) при невысоком пространственном разрешении, как правило, существенно недооценены в методах цифровой трассерной визуализации ввиду того, что сетка с конечным значением измерительной ячейки играет роль фильтра низкой частоты с передаточной функцией, ослабляющей вклад высоких частот. Таким образом, вклад высокочастотной части турбулентного спектра при расчете характеристик оказывается недостаточно учтенным. Повышение пространственного разрешения (уменьшение размера элементарной расчетной ячейки) вплоть до величин нескольких колмогоровских масштабов [25] может существенно уменьшить эту погрешность, особенно для статистических моментов первого и второго порядка. С другой стороны, алгоритмическая ошибка приводит, как правило, к завышению оцененных статистических моментов турбулентных пульсаций скорости.

На рис. 8 приведены распределения КЭТ для вертикального сечения, рассчитанные по мгновенным полям скорости, полученным в экспериментах № 1 и 2 с использованием методов PTV, PTV с коррекцией и адаптивного PIV. Видно, что результаты PTV для эксперимента № 1 дают значение компоненты КЭТ  $\langle v'_x{}^2 \rangle$ , близкое к полученному методом PIV в эксперименте № 2 с большим пространственным разрешением. Таким образом, можно сделать вывод о том, что PTV-алгоритмы позволяют учесть вклад мелкомасштабных флуктуаций скорости даже для эксперимента с низким пространственным разрешением в отличие от адаптивного PIV, который недооценивает уровень флуктуаций в тех же условиях. Анализ зависимостей для КЭТ вдали от импактной поверхности ( $y' > 5$  мм), где значения ее компонент так же, как и осредненной скорости, уменьшаются, асимптотически приближаясь к нулю, показал, что данные, полученные методом PTV с коррекцией, близки к результатам адаптивного PIV-метода, обеспечивающего максимальную точность в зоне, где отсутствуют значительные градиенты скорости. Данные, полученные по стандартному PTV-алгоритму, демонстрируют больший уровень ошибки, особенно для поперечной компоненты КЭТ (рис. 8, б).

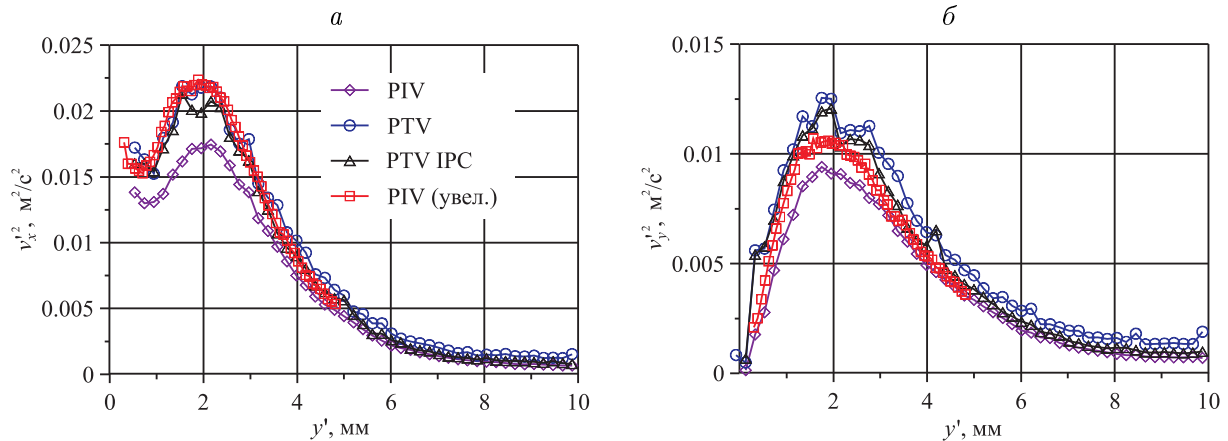


Рис. 8. Распределения радиальной (а) и осевой (б) компонент КЭТ в вертикальном сечении вблизи импактной поверхности ( $x = 3.4$  мм), рассчитанные различными методами; PIV, PTV, PTV IPC — эксперимент № 1, PIV (увел.) — № 2

Таким образом, описанный и реализованный алгоритм коррекции IPC позволяет обеспечить уровень погрешности в методе PTV, сопоставимый с погрешностью адаптивного PIV, при возможности достижения высокого пространственного разрешения без уменьшения размеров полной исследуемой области потока в пределах одного эксперимента.

## Заключение

В статье исследован метод PTV с корреляционной коррекцией IPC. Алгоритм коррекции протестирован на синтетических изображениях, изучено влияние диаметра образов частиц, их концентрации, а также величины смещения на точность рассчитанного поля скорости. Определены оптимальные параметры для изображений частиц и параметры алгоритма обработки. Показано, что применение метода IPC позволяет использовать в эксперименте более широкий диапазон размеров частиц при том же уровне ошибки определения их смещения, что и без применения коррекции. Результаты тестов на синтетических изображениях с равномерно смещенными частицами показали уменьшение полной ошибки в три раза.

Для типичного PIV-изображения с плотностью частиц около  $0.02$  частиц/пикс<sup>2</sup> определен оптимальный размер корреляционного окна, равный 5 пикс, практически не снижающий пространственное разрешение метода PTV.

Проведено экспериментальное исследование гидродинамики осесимметричной импактной струи в двух режимах с различным пространственным разрешением. Турбулентные статистические характеристики течения вблизи импактной поверхности были получены при помощи стандартного PTV, PTV с коррекцией IPC и адаптивного PIV методов.

Результаты эксперимента продемонстрировали преимущества исследуемого подхода. Важным качеством метода PTV с корреляционной коррекцией IPC является небольшая величина ошибки, определяемой эффектом группировки значений смещений частиц у целых величин (peak-locking), сопоставимая с ошибкой в адаптивном PIV. При этом сохраняются преимущества, связанные с более высоким пространственным разрешением и низким уровнем шумов.

Предложен метод отсева ошибочных векторов на основе фильтра скользящего среднего, который может быть использован при обработке полей скорости на нерегулярной сетке с неравномерной концентрацией частиц на изображении. Адаптивный характер данного алгоритма позволяет сохранить высокое пространственное разрешение метода PTV.

## Список литературы

- [1] ТОКАРЕВ М.П., МАРКОВИЧ Д.М., БИЛЬСКИЙ А.В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
- [2] THEUNISSEN R., SCARANO F., RIETHMULLER M.L. An adaptive sampling and windowing interrogation method in PIV // Meas. Sci. Technol. 2007. Vol. 18. P. 275–287.
- [3] ЕТОН R., TAKEHARA K. The particle mask correlation method // Proc. 8th Intern. Symp. on Flow Visualization. Italy, Sorrento, 1998. P. 283.
- [4] UEMURA T., YAMAMOTO F., OHMI K. A high speed algorithm of image analysis for real time measurement of two-dimensional velocity distribution // Flow Visualization / Eds. B. Khalighi, M. Braun, C. Freitas. N.Y.: ASME, 1989. P. 129–134.
- [5] КОБАЯШИ Т., САГА Т., СЕГАВА С. Multipoint velocity measurement for unsteady flow field by digital image processing // Flow Visualization. 1989. Vol. 5. P. 197–202.
- [6] HASSAN Y.A., CANAAN R.E. Full-field bubbly flow velocity measurements using a multiframe particle tracking technique // Exp. Fluids. 1991. Vol. 12. P. 49–60
- [7] МИХЕЕВ А.В., ЗУБТОВ В.М. Enhanced particle-tracking velocimetry (EPTV) with a combined two-component pair-matching algorithm // Meas. Sci. Technol. 2008. Vol. 19. P. 1–16.
- [8] COWEN E., MONISMITH S. A hybrid digital particle tracking velocimetry technique // Exp. Fluids. 1996. Vol. 22. P. 199–201.
- [9] ISHIKAWA M., MURAI Y., WADA A. ET AL. A novel algorithm for particle tracking velocimetry using the velocity gradient tensor // Ibid. 2000. Vol. 29. P. 19–31.
- [10] TAKEHARA K., ADRIAN R., ЕТОН G., CHRISTENSEN K. A Kalman tracker for super-resolution PIV // Ibid. 2000. Vol. 29. P. 34–41.
- [11] WERNET M. New insights into particle image velocimetry data using fuzzy-logic-based correlation/particle tracking processing // Ibid. 2000. Vol. 30. P. 434–447.
- [12] STITOU A., RIETHMULLER M.L. Extension of PIV to super resolution using PTV // Meas. Sci. Technol. 2001. Vol. 12. P. 1398–1403.
- [13] THEUNISSEN R., STITOU A. AND RIETHMULLER M.L. A novel approach to improve the accuracy of PTV methods // Proc. 12th Intern. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 2004.
- [14] БАЕК S.J., ЛЕЕ S.J. A new two-frame particle tracking algorithm using match probability // Exp. Fluids. 1996. Vol. 22. P. 23–32.
- [15] HEINZ O.M., ИЛЮШИН В.В., МАРКОВИЧ Д.М. Application of a PDF's method for the statistical processing of experimental data // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2004. Vol. 25. P. 864–874.

- [16] RAFFEL M., WILLERT C.E., WERELEY S.T., KOMPENHANS J. Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Springer, 2007.
- [17] HOST-MASDEN A., MCCLUSKEY D.R. On the Accuracy and Reliability of PIV measurements // Proc. of the Seventh Intern. Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 1994.
- [18] ESTRADA-PEREZ C.E., DOMINGUEZ ONTIVEROS E.E., HASSAN Y.A., ORTIZ-VILLAFUERTE J. Near-wall study of turbulent channel flows with an improved PTV algorithm // Proc. 6th Intern. Symp. on Particle Image Velocimetry Pasadena. California, USA, 2005.
- [19] WESTERWHEEL J. Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry // Exp. Fluids. 2000. Vol. 29 (Suppl.). P. S3–S12.
- [20] ASTARITA T., CARDONE G. Analysis of interpolation schemes for image deformation methods in PIV // Ibid. 2005. Vol. 38. P. 233–243.
- [21] ASTARITA T. Analysis of interpolation schemes for image deformation methods in PIV: effect of noise on the accuracy and spatial resolution // Ibid. 2006. Vol. 40. P. 977–987.
- [22] АХМЕТБЕКОВ Е.К., БИЛЬСКИЙ А.В., ЛОЖКИН Ю.А. и др. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычисл. методы и программирование. 2006. Т. 7. С. 79–85.
- [23] WESTERWHEEL J., SCARANO F. Universal outlier detection // Exp. Fluids. 2005. Vol. 39. P. 1096–1100.
- [24] COWEN E.A., MONISMITH S.G. A hybrid digital particle tracking velocimetry technique // Ibid. 1997. Vol. 22. P. 199–211.
- [25] SAARENINNE P., PIIRTO M., ELORANTA H. Experiences of turbulence measurement with PIV // Meas. Sci. Technol. 2001. Vol. 12. P. 1904–1910.

*Поступила в редакцию 30 сентября 2008 г.,  
с доработки — 3 февраля 2010 г.*